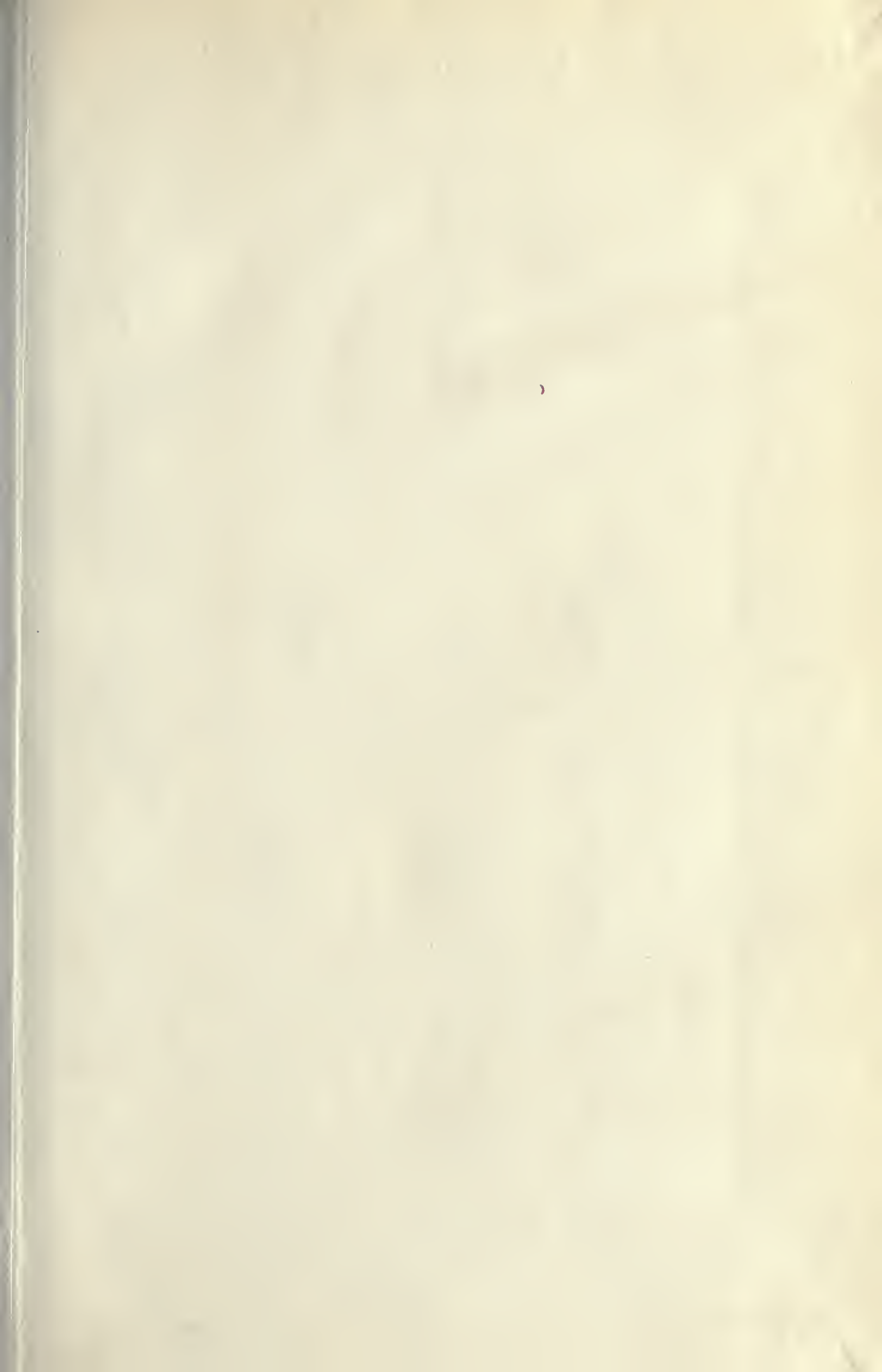
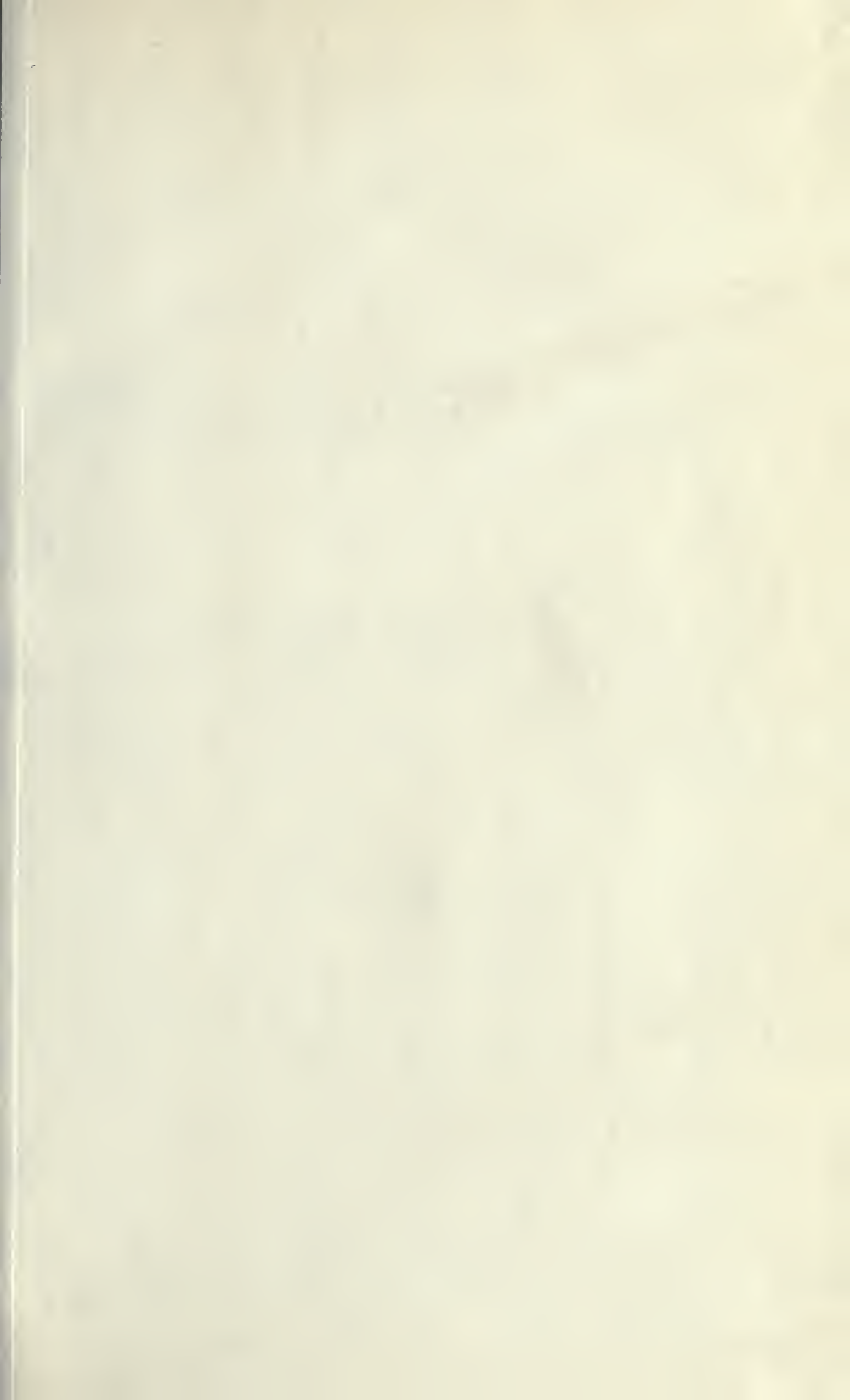

UNIVERSITY OF TORONTO
3 1761 00848156 6











GRUNDZÜGE

DER

PHYSIOLOGISCHEN OPTIK

VON

HERMANN AUBERT,
PROFESSOR IN ROSTOCK.

(Handbuch der gesammten Augenheilkunde, herausgeg. von A. Graefe u. Th. Saemisch.
II. Band. 2. Theil.)

MIT 109 FIGUREN IN HOLZSCHNITT.

LEIPZIG,
VERLAG VON WILHELM ENGELMANN.
1876.

Inhalt.

Capitel IX.

Physiologische Optik

von

Professor **Aubert**
in Rostock.

Einleitung.

§ 1. Die physiologische Optik hat die Bedingungen festzustellen, welche zum Sehen erforderlich sind: diese Bedingungen lassen sich in drei Gruppen bringen, deren erste die Bewegung des Lichtes durch die brechenden Medien des Auges umfasst. Es ist nachzuweisen, welchen Weg das von einem Punkte der Aussenwelt ausstrahlende Licht in den Augenmedien nimmt oder die Brechung des Lichtes durch die Augenmedien. Die Hauptaufgabe dieses Abschnittes ist, nachzuweisen, unter welchen Bedingungen das von einem Punkte ausstrahlende Licht auf einem Punkte der empfindenden Netzhautschicht wieder vereinigt wird, und unter welchen Bedingungen das nicht der Fall ist. Man bezeichnet diesen Abschnitt als die Dioptrik des Auges. Die zweite Gruppe umfasst die durch das Licht erregten Lichtempfindungen, welche zu unserm Bewusstsein kommen und hat im Wesentlichen festzustellen das Verhältniss objectiven Lichtes zur Lichtempfindung, selbstverständlich den Fall mit einbegriffen, in welchem das objective Licht = 0 wird. Die dritte Gruppe der zum Sehen erforderlichen Bedingungen stellt die Benutzung der Lichtempfindungen zur Erkenntniss der Aussenwelt oder des objectiv Gegebenen fest — anders ausgedrückt: die Combination der Lichtempfindungen mit Vorstellungen und anderen Empfindungen, wonach wir das Objective beurtheilen. Man bezeichnet diese Vorgänge als Gesichtswahrnehmungen.

I. Dioptrik des Auges.

§ 2. Gang der Lichtstrahlen durch brechende Medien. Wir stellen uns vor, dass das Licht sich von einem leuchtenden Punkte aus gleich-

mässig nach allen Richtungen hin verbreitet, und bezeichnen eine einzelne dieser Richtungen als Lichtstrahl.

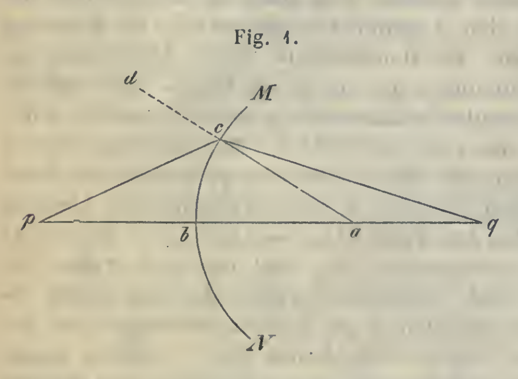
1) So weit das Medium, in welchem das Licht sich verbreitet, homogen ist, ist der Lichtstrahl als eine gerade Linie zu denken; wird das Medium, in welchem der Lichtstrahl verläuft, ein anderes, so ändert sich unter Umständen die Richtung. Und zwar bleibt die Richtung dieselbe, wenn der Lichtstrahl senkrecht zur Fläche des zweiten Mediums gerichtet ist — sie ändert sich, wenn er nicht senkrecht auf die Fläche des zweiten Mediums trifft: der Strahl wird dann theils in dem zweiten Medium abgelenkt, theils von der Grenzfläche der beiden Medien, der brechenden Fläche, unter demselben Winkel zum Einfallslothe, unter welchem er auffällt, zurückgeworfen. Die Grösse der Ablenkung des durchgehenden Lichtstrahles ist abhängig von dem Brechungsvermögen der beiden Medien, welches sich ergiebt aus dem Verhältnisse des Sinus des Einfallswinkels zu dem Sinus des Brechungswinkels. Ist n_1 das Brechungsvermögen des ersten, n_2 das des zweiten Mediums, α der Einfallswinkel, β der Brechungswinkel, so ist

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

Ist das erste Medium Luft, und wird für dieselbe $n_1 = 1$ gesetzt; so ist $n_2 = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, welche Grösse als Brechungsindex oder als Brechungsexponent des zweiten Mediums bezeichnet wird. — Für die Augenmedien werden die Brechungsexponenten experimentell zu bestimmen sein.

2) Ist die Grenzfläche der beiden Medien nicht eine Ebene, sondern eine Kugelfläche, deren Concavität dem ersten Medium, in welchem der Strahl geht, zugekehrt ist, MN (Figur 1) mit dem Radius ab, so wird, wenn p der leuchtende Punkt ist, der Strahl pb, welcher die Kugelfläche normal trifft, durch den Mittelpunkt der Kugelfläche a ungebrochen weiter gehen; ein anderer Lichtstrahl pc treffe die Kugelfläche in c; das Einfallsloth für diesen Punkt ist dca: ist der Brechungsexponent des zweiten Mediums grösser als der des ersten, so wird der Strahl pc so gebrochen, dass er die Linie pa in der Verlängerung in einem Punkte schneidet; dieser Punkt sei q, dessen Lage sich ergiebt aus der Bedingung

Fig. 1.



$$n_1 \sin (pcd) = n_2 \sin (qca) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

wenn n_1 das Brechungsvermögen des ersten Mediums vor der Kugelfläche, n_2 das des zweiten Mediums hinter der Kugelfläche bedeutet.

Nun verhält sich in dem Dreiecke pca

$$\frac{\sin (pca)}{\sin (cpa)} = \frac{ap}{ac}$$ und in dem Dreiecke aqc:

$$\frac{\sin (acq)}{\sin (cqa)} = \frac{aq}{ac}.$$

Wird die erste dieser Gleichungen durch die zweite dividirt, so erhält man

$$\frac{\sin(pcd)}{\sin(acq)} \cdot \frac{\sin(cqa)}{\sin(cpa)} = \frac{ap}{aq};$$

da nun nach 1) $$\frac{\sin(pcd)}{\sin(qca)} = \frac{n_2}{n_1}$$

und in dem Dreieck pcq sich verhält

$$\frac{\sin(cqa)}{\sin(cpa)} = \frac{cp}{cq}$$

so ergiebt sich $$\frac{n_2}{n_1}\frac{cp}{cq} = \frac{ap}{aq} \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

Der Werth $aq = \frac{n_1\, cq \cdot ap}{n_2\, cp}$ oder $bq = ba + \frac{n_1\, cq \cdot ap}{n_2\, cp}$, d. h. die Entfernung vom Mittelpunkte oder vom Scheitelpunkte der Kugeloberfläche bis zum Schneidepunkte hängt also ausser von dem Radius und dem Brechungsexponenten ab von der Entfernung des leuchtenden Punktes und von der Lage des Punktes c, in welchem der Lichtstrahl die Kugelfläche trifft.

Bei Beschränkung auf Strahlen, welche sehr nahe bei b, also der Axe, auftreffen, können wir ohne merklichen Fehler setzen $pc = pb$ und $cq = bq$, woraus 2) alsdann wird

$$\frac{n_2 \cdot bp}{n_1 \; bq} = \frac{ap}{aq} \quad \ldots \ldots \quad 2^b)$$

Setzen wir nun $pb = f_{,}$, $bq = f_{,,}$; $ap = g_{,}$, $aq = g_{,,}$, $ab = r$, so dass $f_{,} + r = g_{,}$ und $f_{,,} - r = g_{,,}$

so wird 2^b) $$\frac{n_2 f_{,}}{n_1 f_{,,}} = \frac{f_{,} + r}{f_{,,} - r} \text{ oder } \frac{n_2 (g_{,} - r)}{n_1 (g_{,,} - r)} = \frac{g_{,}}{g_{,,}}$$

Daraus erhält man durch Umformung

$$n_2 f_{,} (f_{,,} - r) - n_1 f_{,,} (f_{,} - r) = 0$$

$$\frac{n_2 f_{,} f_{,,} - n_1 f_{,,} f_{,}}{r} = n_2 f_{,} + n_1 f_{,,}$$

$$\frac{(n_2 - n_1) f_{,} f_{,,}}{r} = n_2 f_{,} + n_1 f_{,,}$$

und endlich $$\frac{n_2 - n_1}{r} = \frac{n_2}{f_{,,}} + \frac{n_1}{f_{,}}$$

und in gleicher Weise $$\frac{n_2 - n_1}{r} = \frac{n_2}{g_{,}} + \frac{n_1}{g_{,,}} \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

aus denen $f_{,,}$ oder $g_{,,}$ bestimmt werden kann.

Bezeichnen wir für den Fall, dass die Strahlen von einem unendlich entfernten Punkte kommen, wo also $f_{,}$ und damit auch $g_{,} = \infty$ wird, den conjugirten Punkt $f_{,,}$ bezw. $g_{,,}$ mit $F_{,,}$ bezw. $G_{,,}$, so wird

$$F_{,,} = \frac{n_2\, r}{n_2 - n_1}; \; G_{,,} = \frac{n_1\, r}{n_2 - n_1} \quad 4^a)$$

und entsprechend, wenn $f_{,,}$ und $g_{,,} = \infty$ werden, so wird

$$F_{,} = \frac{n_1\, r}{n_2 - n_1} = G_{,,}; \; G_{,} = \frac{n_2\, r}{n_2 - n_1} = F_{,,} \quad \ldots \quad 4^b)$$

Wir nennen in diesem Falle $F_{,}$ die vordere Brennweite, $F_{,,}$ die hintere Brennweite des zweiten Mediums, den Ort des leuchtenden Punktes bei $f_{,,} = \infty$ den vorderen Brennpunkt, bei $f_{,} = \infty$ dagegen den Punkt, in welchem die Strahlen die Axe schneiden, den hinteren Brennpunkt. — Der leuchtende Punkt $f_{,}$ und der Kreuzungs- oder Vereinigungspunkt der Strahlen im zweiten Medium $f_{,,}$, welcher der Bildpunkt des leuchtenden Punktes genannt

wird, stehen daher in einem bestimmten Verhältnisse zu einander und werden **conjugirte Punkte** genannt.

Für diese conjugirten Punkte ergeben sich nun aus 3) und 4) folgende Verhältnisse:

$$\left.\begin{array}{l}\frac{F_,}{f_,}+\frac{F_{,,}}{f_{,,}}=1\\ \frac{G_,}{g_,}+\frac{G_{,,}}{g_{,,}}=1\end{array}\right\}\quad\ldots\quad 5)$$

und daraus bei Auflösung der Gleichungen nach $f_,$ und $f_{,,}$ hin

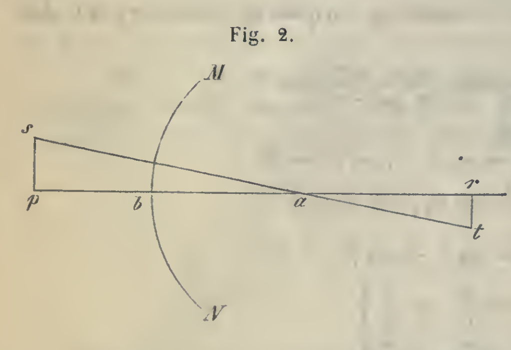
$$\left.\begin{array}{l}f_,=\frac{F_, f_{,,}}{f_{,,}-F_{,,}}\\ f_{,,}=\frac{F_{,,} f_,}{f_,-F_,}\end{array}\right\}\quad\ldots\quad 5^a)$$

Diese Formeln gelten auch für den Fall, dass der leuchtende Punkt sich, statt in p, in q befindet, nur sind dem entsprechend die Indices der Buchstaben zu vertauschen, so dass die Formeln 3) dann werden:

$$\frac{n_1-n_2}{r}=\frac{n_2}{f_{,,}}+\frac{n_1}{f_,}\text{ und }\frac{n_1-n_2}{r}=\frac{n_2}{g_,}+\frac{n_1}{g_{,,}}\,.\quad 6)$$

Befindet sich der leuchtende Punkt nicht in der Axe der kugelförmigen brechenden Fläche, ist also in Figur 2 pba die Axe der brechenden Fläche und s ein zweiter leuchtender Punkt, so wird von seinen Strahlen einer durch den Mittelpunkt a der Kugelfläche MN hindurchgehen und es gilt die obige Ableitung auch für den Punkt s: der diesem Punkte zugehörige conjugirte Punkt t wird dann gleichfalls auf der verlängerten Axe sa liegen. Es sei der Winkel, welchen der Strahl sa mit der Axe pa bildet, sehr klein, und es liege der Punkt t in einem Abstande $= rt$ von der Axe und $= at$ vom Mittelpunkte der Kugelfläche.

Fig. 2.



Setzt man $sa = \gamma_,$ und $at = \gamma_{,,}$, so ist nach der Gleichung 5)

$$\frac{G_,}{\gamma_,}+\frac{G_{,,}}{\gamma_{,,}}=1.$$

Ist pa wieder $= g_,$, $ar = x$ und der Winkel $sap = \alpha$, so ist

$$\gamma_,=\frac{g_,}{\cos\alpha},\ \gamma_{,,}=\frac{x}{\cos\alpha},$$

mithin $\frac{G_,}{g_,}+\frac{G_{,,}}{x}=\frac{1}{\cos\alpha}$.

Wenn α so klein angenommen wird, dass man $\cos a = 1$ setzen kann, so wird auch

$$\frac{G_,}{g_,}+\frac{G_{,,}}{x}=1$$

also $x = g_{,,}$, mithin r der Bildpunkt von dem leuchtenden Punkte p.

Die Punkte zwischen p und s, oder die Linie ps wird sich nun auch in der Linie rt abbilden müssen. Bezeichnen wir ps mit $\beta_,$, rt mit $-\beta_{,,}$, weil es in Bezug auf die Axe par die entgegengesetzte Lage von $\beta_,$ hat, so ist

$$\frac{-\beta_,}{\beta_{,,}}=\frac{g'}{g''},$$

und wenn wir für $g_{\prime}$ und $g_{\prime\prime}$ die in 5) gefundenen Werthe einsetzen,

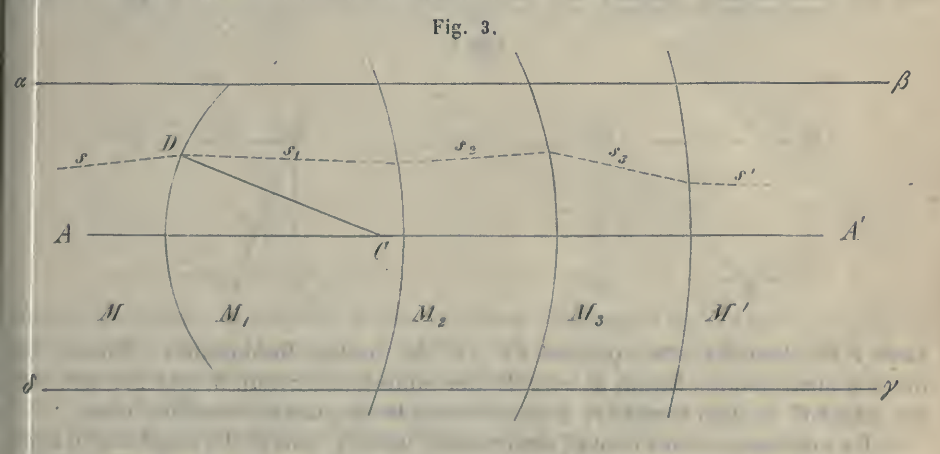
$$\left.\begin{aligned}\frac{\beta_{\prime\prime}}{\beta_{\prime}} &= \frac{G_{\prime\prime}}{G_{\prime} - g_{\prime}} = \frac{G_{\prime\prime} - g_{\prime\prime}}{G_{\prime}} \\ &= \frac{F_{\prime}}{F_{\prime} - f_{\prime}} = \frac{F_{\prime\prime} - f_{\prime\prime}}{F_{\prime\prime}}\end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \qquad 7)$$

Die Grösse des Bildes $\beta_{\prime\prime}$ berechnet sich also aus der Grösse des Objectes $\beta_{\prime}$, seinem Abstande von der brechenden Fläche und der vorderen oder der hinteren Brennweite. (S. Helmholtz, Physiol. Optik p. 42—47.)

3) Sind, wie beim Auge, mehrere brechende Medien mit verschiedenen kugligen Krümmungsflächen gegeben, so lassen sich die gegebenen Formeln anwenden, indem man das von dem Objecte in dem zweiten brechenden Medium entworfene Bild wieder als Object für das dritte Medium betrachtet u. s. w. Während wir aber bei einer Kugelfläche den Scheitelpunkt derselben als den Punkt annehmen, von welchem aus die Brennweite gefunden wird, ist dies für mehrere brechende Flächen nicht mehr in gleicher Weise ausführbar; vielmehr müssen wir, um die Brennweite eines brechenden Systems zu bestimmen, besondere Punkte für dasselbe aufsuchen, von welchen aus wir die Brennweiten des combinirten Systems rechnen. Diese Punkte sind von Gauss bestimmt und Hauptpunkte genannt worden. (Dioptrische Untersuchungen, Göttingen 1841 p. 13.) Im Folgenden lasse ich zunächst die Ableitung und Charakterisirung dieser Punkte nach der Darstellung von C. Neumann (Die Haupt- und Brennpunkte eines Linsensystems, Leipzig 1866) folgen.

Es sei ein System zusammengesetzt aus beliebig vielen durchsichtigen Medien, welche (Fig. 3) mit M, M_1, M_2, ... und deren letztes mit M' bezeichnet

Fig. 3.



werde. Die begrenzenden Flächen seien Kugelflächen, deren Centra sämmtlich in der Axe AA' des Cylinders $\alpha\beta\gamma\delta$ liegen, und es seien die Winkel, unter welchen die eintretenden Lichtstrahlen s, s_1, s_2 ..... s' gegen die Axe geneigt sind, so klein, dass die Sinus und Tangenten der Winkel gleich den Winkeln selbst gesetzt werden können und desgleichen diejenigen Winkel, welche die Radien der Kugelflächen DC u. s. w. mit der Axe des Systems bilden. Denken wir uns beliebig viele, etwa 100 Linien s, welche von ein und demselben Punkte L (dem leuchtenden Punkte) ausgehen, so müssen sich diese in dem zweiten

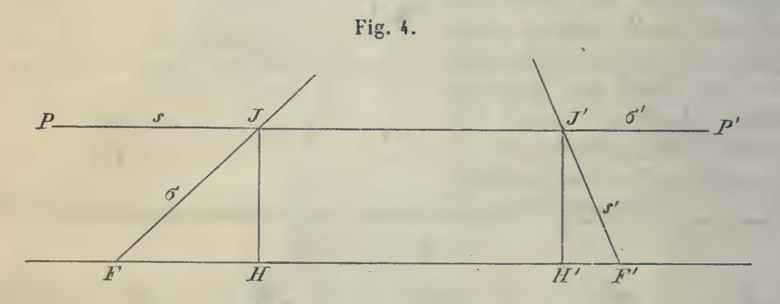
Medium M_1 sämmtlich durchkreuzen in einem Punkte L_1, dem zu L conjugirten Punkte (dem Bildpunkte).

Die Linien s_1 können weiter als Linien angesehen werden, welche sämmtlich von L_1 ausgehen, und sich daher in dem dritten Medium M_2 wiederum in einem einzigen Punkte L_2 durchkreuzen werden, welcher dem Punkte L_1 conjugirt ist und dasselbe wird für die Linien $s_2, s_3, \ldots s'$ gelten. Durchkreuzen sich also die eintretenden Strahlen in einem einzigen Punkte, so gilt dasselbe von den austretenden Strahlen. Gehen die Strahlen von einem einzigen Punkte aus, so müssen sie nach dem Durchgange durch das System sich in einem einzigen Punkte durchkreuzen — diese Punkte sind die conjugirten Punkte. — Für einen anderen in der Axe des Systems gelegenen leuchtenden Punkt A wird sich ebenso ein conjugirter Punkt A' ergeben, und nehmen wir an, dass der leuchtende Punkt in unendlicher Entfernung liegt, so möge der ihm conjugirte Punkt mit F' bezeichnet werden. Ebenso wird es einen leuchtenden Punkt im ersten Medium geben, von welchem Strahlen so ausgehen, dass sie im letzten Medium parallel zu einander werden: dieser Punkt sei F, der vordere Brennpunkt des Systems, während F' der hintere Brennpunkt ist.

Dasselbe muss unter den obigen Voraussetzungen gelten für Ebenen oder Punktsysteme, welche durch L und L', respective durch F und F' rechtwinklig zur Axe gelegt werden, d. h. es werden Ebenen, welche durch die conjugirten Punkte rechtwinklig zur Axe des Systems gelegt sind, zu einander perspectivisch sein.

Es sei in Figur 4 PP' eine zur Axe FF' parallele Linie; das Stück s derselben sei ein eintretender Strahl, der zugehörige austretende Strahl s' gehe in der

Fig. 4.



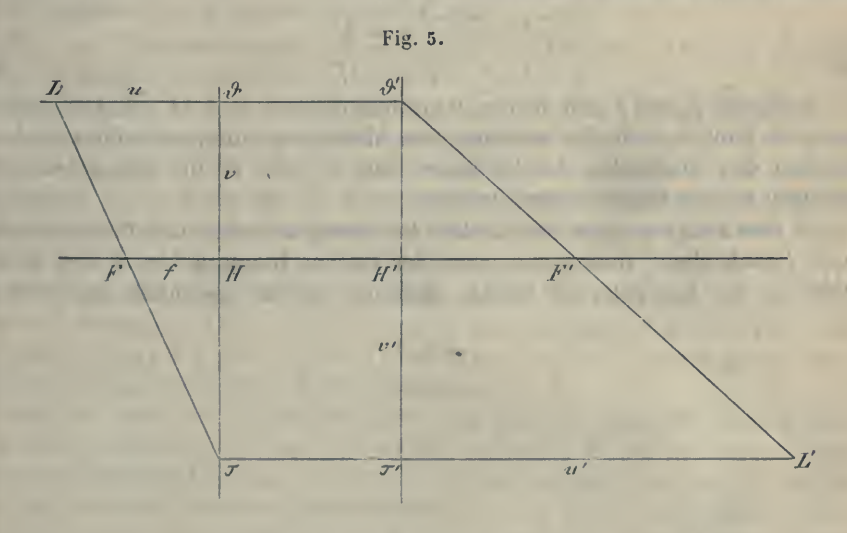
Linie $J'F'$, dann ist, da s parallel FF', F' der hintere Brennpunkt. Ebenso ist für den austretenden Strahl $\sigma' = J'P'$ der eintretende Strahl σ, welcher sich mit der Axe FF' in dem Punkte F, dem vorderen Brennpunkte schneiden muss.

Da nun unter s und σ zwei eintretende, unter s' und σ' die zugehörigen austretenden Strahlen verstanden werden, so wird auch der Schnittpunkt von s und σ conjugirt sein zu dem Schnittpunkte von s' und σ', also auch der Punkt J dem Punkte J'. Werden durch die Punkte J und J' die zur Axe senkrechten Ebenen JH und $J'H'$ gelegt, so werden die in diesen Ebenen gelegenen Punkte $\alpha, \beta, \gamma \ldots$ und $\alpha', \beta', \gamma' \ldots$ ebenfalls zu einander conjugirt sein; daher sind die Punktsysteme $J, \alpha, \beta, \gamma \ldots$ und $J', \alpha', \beta', \gamma' \ldots$ einander perspectivisch in Bezug auf irgend einen noch unbekannten Punkt, welcher in der Axe des Systems gelegen ist. Die Verbindungslinien $JJ', \alpha\alpha', \beta\beta' \ldots$

werden sich sämmtlich in einem einzigen Punkte schneiden, welcher auf der Axe liegt. Da nun JJ' parallel zur Axe ist, so muss der Schnittpunkt in unendlicher Ferne liegen, und dasselbe gilt für $\alpha\alpha'$, $\beta\beta'$ .... Daraus folgt folgender Satz: Es existiren zwei zur Axe senkrechte Ebenen, welche von jedweder mit der Axe parallel gezogenen Linie in zwei einander conjugirten Punkten geschnitten werden. Diese beiden Ebenen werden die Hauptebenen genannt, und ihre in der Axe gelegenen Punkte Hauptpunkte. Die eine Hauptebene ist das Bild der anderen. — Sind H und H' die Hauptpunkte, F und F' die Brennpunkte, so werden $FH = f$ und $F'H' = f'$ die beiden **Hauptbrennweiten** genannt.

Nennen wir einen unendlich entfernten Punkt im ersten Mittel, dessen Strahlen sich in F' durchkreuzen, Ω, und ebenso einen unendlich entfernten Punkt im letzten Mittel, dessen Strahlen sich in F kreuzen, Ω', so sind $\Omega F'$ und $\Omega' F$ zu einander conjugirte Punkte. Sind in Figur 5 ϑ und ϑ' zwei einander

Fig. 5.



conjugirte Punkte, in welchen die Hauptebenen von irgend einer Linie geschnitten werden, und ebenso Ω und F', so wird, wenn der eintretende Strahl von Ω nach ϑ geht, der austretende Strahl durch die Punkte $\vartheta' F'$ gehen. Construiren wir ferner auf den Hauptebenen irgend zwei einander conjugirte Punkte τ und τ', so wird, da $F\Omega'$ gleichfalls conjugirte Punkte sind, der eintretende Strahl $F\tau$ durch die Linie $\tau\tau'$ austreten nach Ω'. Die Linien $L\vartheta$, $L\tau$ stellen somit eintretende, die Linien $\vartheta' L'$, $\tau' L'$ die zugehörigen austretenden Strahlen dar: L und L' sind also conjugirte Punkte. Sind also die Brennpunkte FF' und die Hauptpunkte HH' bekannt, so kann für jeden beliebig gelegenen Punkt L der ihm conjugirte Punkt L' mit Hülfe der Construction in Fig. 5 erhalten werden. — Daraus lassen sich folgende Formeln ableiten:

Der Abstand des Punktes L von der vorderen Hauptebene sei $= u$, der Abstand desselben von der Axe $= v$; entsprechend der Abstand des Punktes L'

von der hinteren Hauptebene $= u'$, von der Axe $= v'$, die vordere Brennweite HF sei gleich f, die hintere Brennweite $H'F' = f'$, so ist in dem Dreieck $L\vartheta\tau$

$$HF : \vartheta L = \tau H : \tau\vartheta \text{ oder}$$

$$\frac{f}{u} = \frac{v}{v + v'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad 8^{a})$$

und entsprechend in dem Dreieck $L'\vartheta'\tau'$

$$\frac{f'}{u'} = \frac{v}{v + v'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad 8^{b})$$

daher

$$\frac{f}{u} + \frac{f'}{u'} = 1 \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad 8^{c})$$

Multiplicirt man $8^{a})$ mit v, und $8^{b})$ mit v', so erhält man

$$f\frac{v}{u} = f'\frac{v'}{u'} \quad . \quad . \quad . \qquad 8^{d})$$

Kehren wir $8^{a})$ um und ziehen auf beiden Seiten 1 ab, so erhalten wir

$$\frac{u - f}{f} = \frac{v}{v'} \text{ und statt } 8^{b}) \ \frac{u' - f'}{f'} = \frac{v'}{v} \quad . \quad . \quad . \qquad 8^{e})$$

Durch Multiplication beider Ausdrücke erhält man

$$\frac{(u - f)}{f} \, \frac{(u' - f')}{f'} = 1$$

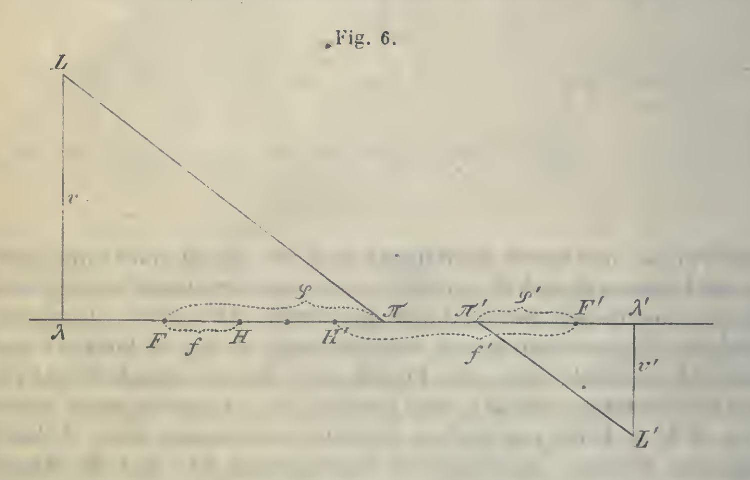
oder

$$(u - f)\,(u' - f') = ff' \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad 8^{f}).$$

Sind also f und f' die beiden Hauptbrennweiten und LL' zwei zu einander conjugirte Punkte, so finden zwischen den Abständen u und v des Punktes L und zwischen den Abständen der Punkte u' und v' von L' die angegebenen Beziehungen zu den Hauptbrennweiten statt.

Es lässt sich nun noch eine andere Beziehung zwischen den beiden Punkten L und L' aufstellen, indem man statt der beiden Hauptpunkte H und H' zwei andere in der Axe gelegene Punkte einführt, welche gleichfalls in einem ge-

Fig. 6.



gebenen System fest sind und Knotenpunkte genannt werden (Möbius, Crelles Journal f. Mathem. 1830 Bd. 5, p. 113. Listing, Dioptrik im Handwörterbuch der Physiologie IV, 1851, p. 464). Es sei in Figur 6 ein Punkt π von dem vorderen Brennpunkte F um die Grösse φ entfernt, und ein Punkt π' um die Entfernung φ' von F' gelegen, — es seien ferner λ und λ' die Projectionspunkte von

L und L' auf die Axe, daher $\lambda L = v$ und $\lambda' L' = v'$, ferner sei die Entfernung $\lambda\pi = \omega$, die Entfernung $\lambda'\pi' = \omega'$, so ist, da

$$\lambda F = \lambda H - f \text{ und } \lambda' F' = \lambda' H' - f'$$

war, wenn man λH mit u und $\lambda' H'$ mit u' bezeichnet,

$$\lambda F = u - f = \omega - \varphi$$

und

$$\lambda' F' = u' - f' = \omega' - \varphi'.$$

Substituirt man diese Werthe in die Formeln 8^e), so ergiebt sich

$$\frac{\omega - \varphi}{f} = \frac{v}{v'} \text{ und } \frac{\omega' - \varphi'}{f'} = \frac{v'}{v}, \text{ woraus}$$

$$\frac{\omega}{v} = \frac{fv + \varphi v'}{v v'} \text{ und } \frac{\omega'}{v'} = \frac{f' v' + \varphi' v}{v v'} \quad . \quad . \quad . \qquad 9)$$

Setzt man nun weiter $\varphi = f'$ und $\varphi' = f$, so erhält man:

$$\frac{\omega}{v} = \frac{fv + f' v'}{v v'} \text{ und } \frac{\omega'}{v'} = \frac{fv + f' v'}{v v'} \qquad 9^b)$$

woraus sich ergiebt

$$\frac{\omega}{v} = \frac{\omega'}{v'} \quad . \quad . \quad . \qquad 9^c).$$

Es folgt daraus, dass $L\pi$ parallel ist $L'\pi'$.

Da $\varphi' = f$ gemacht worden ist, so ist $\pi' F' = HF$ und da $\varphi = f'$ gemacht wurde, so ist auch $\pi F = H' F'$.

Die Punkte π und π', die Knotenpunkte, haben daher folgende Beziehungen zu den Hauptpunkten und Brennpunkten: Der Punkt π, der vordere Knotenpunkt, liegt in der Axe des optischen Systems symmetrisch zum hinteren Hauptpunkte H' in Bezug auf die Brennpunkte, und der hintere Knotenpunkt symmetrisch zum vorderen Hauptpunkte H in Bezug auf die Brennpunkte — oder:

der vordere Knotenpunkt liegt vorn vom vorderen Brennpunkte eben so weit entfernt, wie der hintere Hauptpunkt vom hinteren Brennpunkte; der hintere Knotenpunkt von dem hinteren Brennpunkte eben so weit entfernt, wie der vordere Hauptpunkt von dem vorderen Brennpunkte.

Aus der Lage der Hauptpunkte lässt sich also die Lage der Knotenpunkte finden und umgekehrt. — Da wir HF als die vordere, $H'F'$ als die hintere Hauptbrennweite bezeichnet haben, so können wir auch sagen: der vordere Knotenpunkt liegt von dem vorderen Brennpunkte um die hintere Hauptbrennweite — der hintere Knotenpunkt von dem hinteren Brennpunkte um die vordere Hauptbrennweite entfernt.

Es folgt ferner: dass die beiden Knotenpunkte dieselbe Distanz von einander haben, welche die beiden Hauptpunkte von einander haben.

Da ferner $L\pi$ parallel ist $L'\pi'$, so ergiebt sich für den Weg eines Lichtstrahles, wenn die Richtung des Strahles im ersten Mittel durch den vorderen Knotenpunkt geht, sie im letzten Mittel parallel der Richtung im ersten Mittel ist.

4) Wir wollen nun die Hauptbrennweiten und die Entfernungen der Hauptpunkte von den Flächen der brechenden Medien in einem combinirten Systeme aus den Brechungsexponenten, den Radien der Kugelflächen und den Distanzen der Kugelflächen von einander bestimmen, indem wir der Ableitung von Helmholtz (Physiologische Optik p. 56) folgen.

Die Brennweiten für eine einzige brechende Kugelfläche haben wir in 4ᵃ) und 4ᵇ) gefunden:

$$f_{,} = \frac{n_1 r_1}{n_2 - n_1},\ f_{,,} = \frac{n_2 r_1}{n_2 - n_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad 10)$$

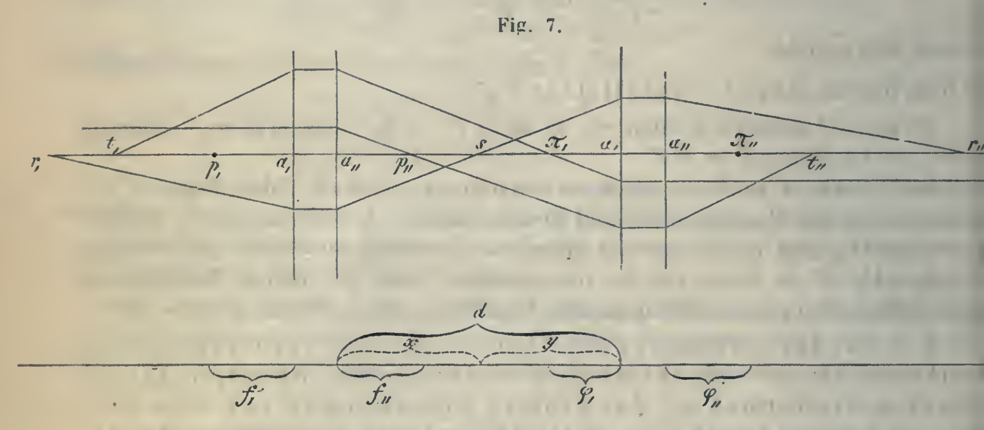
für eine zweite Kugelfläche hinter der ersten sollen sie entsprechend sein

$$\varphi_{,} = \frac{n_2 r_2}{n_3 - n_2},\ \varphi_{,,} = \frac{n_3 r_2}{n_3 - n_2} \quad . \quad . \quad . \qquad 10^a)$$

Aus diesen Brennweiten der Kugelflächen und der Distanz derselben leitet nun Helmholtz folgende Formeln für die Hauptbrennweiten des combinirten Systems und für die Entfernung der Hauptpunkte von den Kugelflächen folgendermassen ab:

In den beiden optischen Systemen A und B Fig. 7, welche ein und dieselbe Axe haben, seien für das System A die beiden Brennpunkte $p_{,}$ und $p_{,,}$, die beiden Hauptpunkte $a_{,}$ und $a_{,,}$, für das System B die beiden Brennpunkte $\pi_{,}$ und

Fig. 7.



$\pi_{,,}$, die beiden Hauptpunkte $\alpha_{,}$ und $\alpha_{,,}$. Der Abstand des ersten Hauptpunktes $\alpha_{,}$ des Systems B von dem zweiten Hauptpunkte $a_{,,}$ des Systems A sei $= d$ (welches positiv ist, weil $\alpha_{,}$ hinter $a_{,,}$ liegt). Die Hauptbrennweiten des ersten Systems $a_{,} p_{,}$ und $a_{,,} p_{,,}$ seien $= f_{,}$ und $f_{,,}$, die des zweiten Systems $\alpha_{,} \pi_{,}$ und $\alpha_{,,} \pi_{,,}$ seien $= \varphi_{,}$ und $\varphi_{,,}$. Der erste Brennpunkt des combinirten Systems ist offenbar das Bild, welches das System A vom ersten Brennpunkte $\pi_{,}$ des Systems B entwirft: die von ihm ausgehenden Strahlen müssen nach der Brechung im zweiten Systeme mit der Axe parallel sein: dieser Punkt sei $t_{,}$. Die Entfernung $a_{,,} \pi_{,}$ ist $= d - \varphi_{,}$; daraus ergiebt sich, da $a_{,} t_{,} : a_{,} p_{,} = a_{,,} \pi_{,} : \pi_{,} p_{,,}$, für $a_{,} t_{,}$ der Werth

$$a_{,} t_{,} = \frac{(d - \varphi_{,}) f_{,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}}$$

und entsprechend, wenn $t_{,,}$ der Ort des zweiten Brennpunktes des combinirten Systems ist

$$a_{,,} t_{,,} = \frac{(d - f_{,,}) \varphi_{,,}}{d - \varphi_{,} - f_{,,}}.$$

Die beiden Hauptpunkte des combinirten Systems müssen, da der eine das Bild des anderen ist, ein beiden gemeinsames Bild in dem mittleren Medium zwischen den beiden optischen Systemen haben. Ist dieses Bild s in Fig. 7, und sind $r_{,}$ und $r_{,,}$ die Hauptpunkte des combinirten Systems, so ist das Bild von s gleich dem von $r_{,}$ und $r_{,,}$, und ist σ die Grösse des Objectes in s, $\beta_{,}$ die des

Bildes in $r_,$, $\beta_{,,}$ die des Bildes in $r_{,,}$, ferner die Länge $a_{,,} s = x$, die von $s \alpha_, = y$, so ist nach Relation 7)

$$\frac{\beta_,}{\sigma} = \frac{f''}{f_{,,} - x} \text{ und } \frac{\beta_{,,}}{\sigma} = \frac{\varphi_,}{\varphi_, - y}$$

Da $\beta_, = \beta_{,,}$ sein soll, so muss

$$\frac{f''}{f_{,,} - x} = \frac{\varphi_,}{\varphi_, - y} \text{ oder } \frac{x}{f_{,,}} = \frac{y}{\varphi_,} \text{ sein,}$$

oder

$$\frac{a_{,,} s}{a_{,,} p_{,,}} = \frac{\alpha_, s}{\alpha_, \pi_,} \quad \ldots \ldots \quad 11)$$

Um also den Punkt im mittleren Medium zu finden, dessen Bilder die beiden Hauptpunkte sind, theile man die Entfernung zwischen dem zweiten Hauptpunkte des ersten Systems und dem ersten Hauptpunkte des zweiten Systems in zwei Theile, welche sich zu einander verhalten, wie die zu diesen Hauptpunkten gehörigen Hauptbrennweiten der beiden Systeme.

Es ist nun $x = a_{,,} s$, $y = \alpha_, s$, und da vorhin $a_{,,} \alpha_, = d$ gesetzt war, so ist $x + y = d$, mithin

$$\frac{x}{f_{,,}} = \frac{d - x}{\varphi_,} \text{ und } \frac{y}{\varphi_,} = \frac{d - y}{f_{,,}}$$

daher

$$x = \frac{d f_{,,}}{\varphi_, + f_{,,}}, \qquad y = \frac{d \varphi_,}{\varphi_, + f_{,,}}$$

Nun verhält sich $a'' s$ $(= x)$ zu $p_{,,} s$ $(= x - f_{,,})$ wie $a_, p_,$ $(= f_,)$ zu $a_, r_,$ $(= h_,)$, wenn $a_, r_, = h_,$ die Entfernung des ersten Hauptpunktes des combinirten Systems von dem ersten Hauptpunkte des ersten Systems bedeutet, woraus sich ergiebt

$$h_, = \frac{x f_,}{x - f_{,,}} \text{ und da } x = \frac{d f_{,,}}{\varphi_, + f_{,,}} \text{ war, so ist}$$

$$h_, = \frac{d \cdot f_,}{d - \varphi_, - f_{,,}}.$$

Entsprechend findet man

$$h_{,,} = \frac{d \varphi_{,,}}{d - \varphi_, - f_{,,}} \quad \ldots \ldots \quad 12)$$

Damit würden die beiden Hauptpunkte des combinirten Systems gefunden sein.

Die Hauptbrennweiten des combinirten Systems, welche wir mit $F_,$ und $F_{,,}$ bezeichnen, sind nun gleich der Entfernung der Hauptpunkte von den Brennpunkten.

Für den ersten Brennpunkt des combinirten Systems hatten wir

$$a_, t_, = \frac{(d - \varphi_,) f_,}{d - \varphi_, - f_{,,}}$$

Ziehen wir davon den für den ersten Hauptpunkt gefundenen Werth $a_, r_,$ ab, also $F_, = a_, t_, - a_, r_,$, so erhalten wir

$$- F_, = \frac{d f_, - \varphi_, f_, - d f_,}{d - \varphi_, - f_{,,}} = \frac{- \varphi_, f_,}{d - \varphi_, - f_{,,}} \text{ also}$$

$$F_, = \frac{\varphi_, f_,}{\varphi_, + f_{,,} - d}$$

und für

$$F_{,,} = \frac{\varphi_{,,} f_{,,}}{\varphi_, + f_{,,} - d} \quad \ldots \ldots \quad 13)$$

Setzen wir nun für $f_, \varphi_, f_{,,} \varphi_{,,}$ die oben 4) und 10) erhaltenen Relationen ein, so ergiebt sich für

$$\left.\begin{aligned} F_{,} &= \frac{n_1 r_1 n_2 r_2}{n_2 (r_2 (n_2 - n_1) + r_1 (n_3 - n_2)) - (n_3 - n_2) (n_2 - n_1) d} \\ F_{,,} &= \frac{n_2 r_1 n_3 r_2}{n_2 (r_2 (n_2 - n_1) + r_1 (n_3 - n_2)) - (n_3 - n_2) (n_2 - n_1) d} \end{aligned}\right\} \quad 14$$

$$\left.\begin{aligned} h_{,} &= \frac{n_1 r_1 (n_2 - n_3) d}{n_2 (r_2 (n_2 - n_1) + r_1 (n_3 - n_2)) - (n_3 - n_2) (n_2 - n_1) d} \\ h_{,,} &= \frac{n_3 r_2 (n_1 - n_2) d}{n_2 (r_2 (n_2 - n_1) + r_1 (n_3 - n_2)) - (n_3 - n_2) (n_2 - n_1) d} \end{aligned}\right\} \quad 15$$

Hieraus lassen sich also die Hauptpunkte und ihre Entfernung von den ersten Hauptpunkte der ersten brechenden Kugelfläche finden, wenn die Brechungsexponenten, Radien und die Distanzen der Kugelflächen von einander gegeben sind. Auch ergiebt sich dann zugleich die Lage der beiden Knotenpunkte, da wie wir sahen, der Abstand des ersten Knotenpunktes vom ersten Brennpunkte gleich ist der zweiten Hauptbrennweite, und der Abstand des zweiten Knotenpunktes vom zweiten Brennpunkte gleich der ersten Hauptbrennweite, oder noch einfacher der Abstand des zweiten Knotenpunktes von dem ersten Knotenpunkte gleich ist dem Abstande der beiden Hauptpunkte von einander.

Wird $n_3 = n_1$, d. h. befindet sich eine Linse mit kugligen Begrenzungsflächen in einem gleichmässigen Medium, so wird

$$F_{,} = F_{,,} = \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{(n_2 - n_1) (n_2 (r_2 - r_1)) + (n_2 - n_1) d} \quad . \; . \; . \quad 14^a$$

$$\left.\begin{aligned} h_{,} &= \frac{n_1 d r_1}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d} \\ h_{,,} &= -\frac{n_1 d r_2}{n_2 (r_2 - r_1) + (n_2 - n_1) d} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \quad 15^a$$

Sind endlich die beiden Krümmungen einander gleich, also $+ r_2 = - r$ und ist $n_1 = 1$, so können wir die optischen Elemente mit r und n bezeichnen. Befindet sich also eine biconvexe Linse in Luft, so wird

$$F_{,} = F_{,,} = \frac{n r^2}{(n - 1) (2 n r - (n - 1) d)} \quad . \; . \; . \quad 14^b$$

$$h_{,} = h_{,,} = -\frac{d \cdot r}{2 n r - (n - 1) d} \quad . \; . \; . \; . \quad 15^b$$

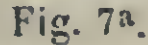
Mein College, der Professor der Physik Herr L. Matthiessen hat mir folgende sehr einfache Formeln zur Berechnung der Cardinalpunkte des Auges, deren Publication demnächst in der Zeitschrift für Mathematik und Physik von Schlömilch erfolgen wird, gütigst mitgetheilt:

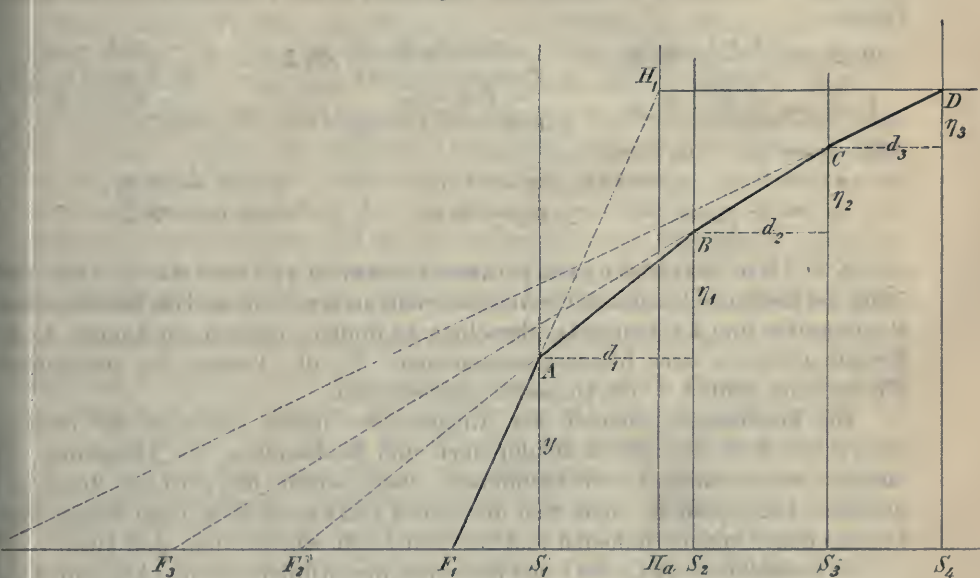
Seien S_1 S_2 S_3 ... S_n die centrirten sphärischen Begrenzungsflächen beliebig vieler Schichten von abwechselnder optischer Dichtigkeit, so lassen sich die beiden Hauptbrennweiten darstellen durch einen Ausdruck von der Form

$$f = F_1 S_1 \frac{F_2 S_2 \times F_3 S_3 \times F_4 S_4 \times \ldots . \; F_n S_n}{(F_2 S_2 - d_1) (F_3 S_3 - d_2) (F_4 S_4 - d_3) \times \ldots . \; (F_n S_n - d_{n-1})}.$$

Um diesen Satz zu beweisen, betrachten wir den Gang eines Lichtstrahles, welcher, vom ersten Hauptbrennpunkte F_1 ausgehend, bei A in das System eintritt, den Weg $ABCD$ beschreibt und an der Grenze des Systems parallel mit der Axe austritt. Der Durchschnittspunkt $H_{,}$ des parallel mit der Axe austretenden Strahles mit dem Focalstrahl ist ein Punkt der ersten Hauptebene.

Es seien y die Ordinate des Punktes A und $\eta_1\ \eta_2\ \eta_3$ die partiellen Elevationen des Strahles von einer brechenden Fläche zur andern, so wie $d_1\ d_2\ d_3$ die Dicken der Schichten. Ferner seien $F_1\ F_2\ F_3\ F_4$ die partiellen Brennpunkte der


Fig. 7a.



Strahlenelemente F_1A, AB, BC, CD und f die erste Hauptbrennweite $F_1\,H_\alpha$, so ergeben sich aus ähnlichen Dreiecken folgende Relationen:

1) $y : F_2\,S_1 = \eta_1 : d_1$ und $(y + \eta_1) : F_2\,S_2 = \eta_1 : d_1$

2) $(y + \eta_1) : F_3\,S_2 = \eta_2 : d_2$ $(y + \eta_1 + \eta_2) : F_3\,S_3 = \eta_2 : d_2$

3) $(y + \eta_1 + \eta_2) : F_4\,S_3 = \eta_3 : d_3$ $(y + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3) : F_4\,S_4 = \eta_3 : d_3$ u. s. f.

Hieraus folgt (4) $\frac{d_1}{\eta_1} = \frac{d_2}{\eta_2}\,\frac{F_2\,S_2}{F_3\,S_2}$, (5) $\frac{d_2}{\eta_2} = \frac{d_3}{\eta_3}\,\frac{F_3\,S_3}{F_4\,S_3}$ u. s. f.

Ferner ist $\frac{f}{F_1\,S_1} = \frac{y + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{y} = \frac{d_1}{\eta_1} \cdot \frac{y + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{F_2\,S_1}$ (nach (1)).

Substituiren wir nun successive die Gleichungen (4) (5) in die letztere, so erhalten wir

$$\frac{f}{F_1\,S_1} = \frac{d_1}{\eta_1}\,\frac{y + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{F_2\,S_1},$$

$$= \frac{F_2\,S_2}{F_2\,S_1} \cdot \frac{d_2}{\eta_2}\,\frac{y + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{F_3\,S_2}$$

$$= \frac{F_2\,S_2 \times F_3\,S_3}{F_2\,S_1 \times F_3\,S_2} \cdot \frac{d_3}{\eta_3} \cdot \frac{y + \eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{F_4\,S_3}.$$

Schliesst die Reihe mit η_3, so ist

$$\frac{f}{F_1\,S_1} = \frac{F_2\,S_2 \times F_3\,S_3 \times F_4\,S_4}{F_2\,S_1 \times F_3\,S_2 \times F_4\,S_3} = \frac{F_2\,S_2 \times F_3\,S_3 \times F_4\,S_4}{(F_2\,S_2 - d_1) \times (F_3\,S_3 - d_2) \times (F_4\,S_4 - d_3)}.$$

Ist φ die zweite Hauptbrennweite, so ist analog

$$\varphi = \Phi_1\,\Sigma_1\,\frac{\Phi_2\,\Sigma_2 \times \Phi_3\,\Sigma_3 \times \Phi_4\,\Sigma_4 \times \ldots}{(\Phi_2\,\Sigma_2 - \delta_1)\,(\Phi_3\,\Sigma_3 - \delta_2)\,(\Phi_4\,\Sigma_4 - \delta_3)\ldots}.$$

Es sei nun M_1 das erste zwischen S_1 und S_2 gelegene Medium, M_2 das zweite u. s. f., ferner n_1 das Brechungsverhältniss von Luft in M_1, n_2 dasjenige von M_2 in M_3 u. s. f., endlich die Krümmungsradien der Flächen resp. r_1 r_2 r_3 u. s. f. alles von links nach rechts gezählt; dagegen ν_1 ν_2 ν_3 . . . . ϱ_1 ϱ_2 ϱ_3 . . . δ_1 δ_2 δ_3 . . . . . von rechts nach links gezählt. So ist z. B. für drei brechende Flächen

$$\Phi_3 \Sigma_3 = \frac{n_1 r_1}{n_1 - 1}; \quad \Phi_2 \Sigma_2 = \frac{-\Phi_3 \Sigma_2 n_2 r_2}{-\Phi_3 \Sigma_2 (n_2 - 1) - r_2}, \quad \Phi_1 \Sigma_1 = \frac{-\Phi_2 \Sigma_1 n_3 r_3}{-\Phi_2 \Sigma_1 (n_3 - 1) - r_3}$$

$$F_3 S_3 = \frac{r_1 \varrho_1}{r_1 - 1}; \quad F_2 S_2 = \frac{-F_3 S_2 r_2 \varrho_2}{-F_3 S_2 (r_2 - 1) - \varrho_2}, \quad F_1 S_1 = \frac{-F_2 S_1 r_3 \varrho_3}{-F_2 S_1 (r_3 - 1) - \varrho_3}$$

und $\delta_1 = d_2, \quad \delta_2 = d_1,$

$$\nu_1 = 1 : n_3, \quad \nu_2 = 1 : n_2, \quad \nu_3 = 1 : n_1 \qquad h_, = f - F_, S_,,$$

$$\varrho_1 = -r_3, \quad \varrho_2 = -r_2, \quad \varrho_3 = -r_1 \qquad h_{,,} = \varphi - \Phi_, \Sigma_,.$$

§ 3. **Die Brechungsexponenten der Augenmedien.** Um den Gang der Lichtstrahlen durch die Augenmedien zu ermitteln und die Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte derselben zu finden, müssen wir kennen 1) die Brechungsindices oder Brechungsexponenten, 2) die Radien der brechenden Flächen und endlich 3) die Distanzen der letzteren.

Die Brechungsexponenten der Augenmedien lassen sich nach der Frauenhofer'schen Methode mittelst Hohlprismen und Beobachtung der Ablenkung der dunkeln Spectrumlinien nicht bestimmen, theils wegen der geringen Menge der flüssigen Augenmedien, theils weil die Cornea und Krystalllinse nicht flüssig sind. Es sind daher andere Methoden in Anwendung gebracht worden, und zwar

1) die Methode von Chossat und Brewster, das zu untersuchende Augenmedium in die Form einer Concavlinse von bekannter Krümmung zu bringen und die Focaldistanz eines Objectes zu bestimmen, wenn der Raum der Concavlinse das eine Mal mit Luft, das andere Mal mit Wasser und das dritte Mal mit dem zu untersuchenden Augenmedium gefüllt ist. Statt der Focaldistanz bestimmten Cahours und Becquerel die Vergrösserung des Objectes und ihnen folgte W. Krause, indem er das Objectiv eines Mikroskops durch eine Convexlinse von bekannter Brennweite ersetzte, und eine ebene Glasplatte gegen die untere Krümmung der Convexlinse mittelst einer Schraubung anpresste: der zwischen der unteren Convexität der Glaslinse und der oberen Ebene des planen Glases befindliche Raum bildete also die Concavlinse, welche mit Luft, Wasser oder Augenmedien angefüllt werden konnte. Als Object benutzte Krause eine mit feiner Theilung versehene Glasplatte (Glasmikrometer), und las an einem eben solchen im Ocular befindlichen Mikrometer ab, wie viele Theilstriche des Ocularmikrometers auf einen Theilstrich des Objectivmikrometers gingen und berechnete aus den erhaltenen Grössen die Brechungsindices der verschiedenen brechenden Augenmedien. Helmholtz verfuhr in ähnlicher Weise, indem er statt einer Concavlinse, eine Planconvexlinse aus den zu untersuchenden Augenmedien bildete.

Die von Krause im Mittel von Bestimmungen an 20 menschlichen Augen gewonnenen Werthe sind, wenn man den Brechungsexponenten des Wassers = 1,3342 setzt, folgende:

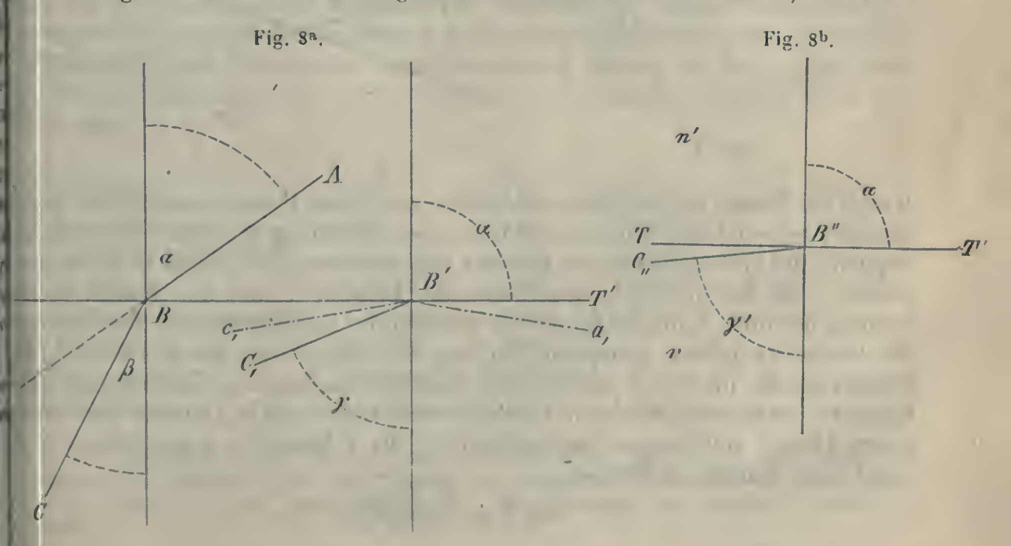
Cornea	Humor aqueus	Corpus vitreum	Lentis stratum externum.	Lentis stratum medium.	Nucleus
1,3507	1,3420	1,3485	1,4053	1,4294	1,4541.

Die Maxima und Minima weichen indess sehr bedeutend von den Mitteln ab für die Hornhaut um 0,007, für die übrigen Substanzen noch bedeutender, für die Linse, bei Ausschluss eines ganz abnormen Werthes, doch noch um 0,02.

Chossat und Brewster erhielten durchgehends niedrigere Werthe. Helmholtz fand bei Bestimmung des Brechungsexponenten für Wasser = 1,3354, für den *Humor aqueus* 1,3365, für *Corpus vitreum* 1,3382, für die äussere Linsenschicht 1,4189. (Krause, Die Brechungsindices der durchsichtigen Medien des menschlichen Auges, Hannover 1855. — Helmholtz, Physiol. Optik p. 78.)

2) ist von Abbe eine Methode zur Bestimmung der Brechungsindices angegeben worden, welche für minimale Flüssigkeitsmengen eine sehr genaue Bestimmung möglich macht. Sie beruht auf einem schon von Wollaston hierzu benutzten Principe, nämlich der Messung des Winkels der totalen Reflexion zwischen Glas und der zu untersuchenden Flüssigkeit. Zwischen zwei Medien mit den Brechungsexponenten n und ν erfolgt an der Grenzfläche totale Reflexion, sobald der Einfallswinkel eines Strahles gegen die Grenzfläche im stärker brechenden Medium gleich wird dem durch die Relation $\frac{n}{\nu} = \sin\gamma$ bestimmten Winkel; ist der Brechungsexponent des einen Mittels, z. B. ν bekannt, und wird der Winkel γ, bei welchem zuerst totale Reflexion eintritt, beobachtet, so ergiebt sich daraus der gesuchte Brechungsexponent n des zweiten Mittels. Während Wollaston den Eintritt der maximalen Intensität des reflectirten Strahles bestimmte, wobei die Unsicherheit des Urtheils über das Maximum der Helligkeit Fehler bedingt, beobachtete Abbe den Eintritt der minimalen Intensität, d. h. das vollständige Verschwinden des durchgehenden Strahles, welcher sehr sicher bestimmt werden kann. Ist der Brechungsexponent des einen Mediums constant, so wird sich der Einfallswinkel, bei welchem es keinen gebrochenen Strahl mehr giebt, ändern mit dem Brechungsexponenten des zweiten Mediums.

Ist Figur 8ᵃ TT' die Trennungsfläche der beiden Medien n und ν, von denen

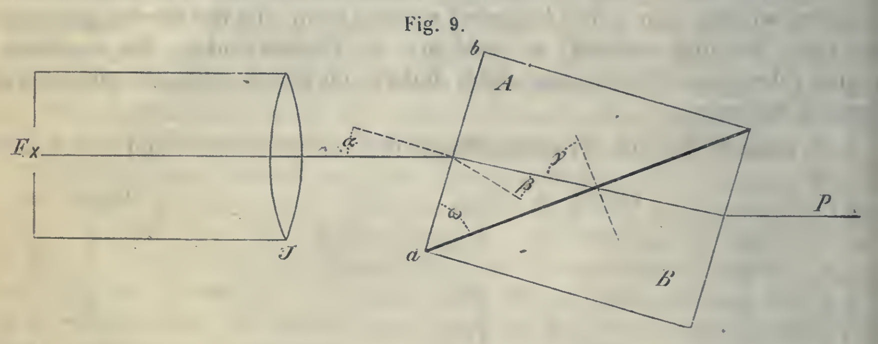


ν das stärker brechende ist, so mag ein Strahl AB nach C hin gebrochen werden ein Strahl, welcher in der Grenzfläche TT', also unter $\alpha = 90^o$, einfällt, ma dann nach $C_,$ gebrochen werden: der Brechungswinkel $\gamma_,$ wird dann der Winke sein, unter welchem der Strahl $C_,B_,$ nicht mehr in das Medium n eintritt, sonder an der Grenze desselben verläuft; wird γ noch grösser, so wird der Strahl an de Grenzfläche unter gleichem Winkel reflectirt; γ ist also für diesen Fall de Grenzwinkel. — Für ein anderes Medium n' (Figur 8[b]) werde ein Strahl $B''T$ in der Trennungsfläche nach $C_{,,}$ gebrochen, so wird γ' der Grenzwinkel sein. Im ersten Falle Figur 8[a] ist $\frac{1}{\sin\gamma} = \frac{\nu}{n}$, im zweiten Falle Figur 8[b] ist $\frac{1}{\sin\gamma'} = \frac{\nu}{n'}$ werden $\sin\gamma$ und $\sin\gamma'$ durch Beobachtung ermittelt, so ergiebt sich daraus und $n_,$.

Abbe benutzt nun zur Auffindung des Grenzwinkels für eine unbekannt Flüssigkeit eine dünne Schicht derselben, welche zwischen die Hypotenusen flächen zweier rechtwinkliger Prismen von Glas gebracht wird und also eine plan parallele Platte darstellt, welche in allen Stellungen das einfallende Licht ohn Ablenkung austreten lässt. Die Prismen müssen einen höheren Brechungsinde haben, als die zu untersuchende Flüssigkeitsschicht. Die Prismen wirken dan als dicke planparallele Glasplatte, welche den einfallenden Lichtstrahl in völli ungeänderter Richtung austreten lässt: der einfallende Strahl hört aber auf aus treten zu können, wenn der Grenzwinkel γ erreicht ist, bezw. γ' (Figur 8[b]).

Die Beobachtungsweise ist von Abbe in folgender Weise ausgeführt: i Figur 9 ist J ein Fernrohrobjectiv, in dessen Brennpunkt F ein kurzer, zur Eben der Zeichnung senkrechter, von hinten beleuchteter Spalt angebracht ist; A un

Fig. 9.



B sind die beiden rechtwinkligen Prismen, mit ihren Hypotenusenflächen gege einander befestigt und um eine zur Ebene der Zeichnung senkrecht stehende Ax drehbar; die Flüssigkeitsschicht befindet sich zwischen den beiden Hypotenusen flächen. Ist die Brechung des Glases der Prismen ν und der Winkel w de Prismen bekannt, kann der Winkel a, welchen die Fernrohraxe mit der Normale der Fläche ab bildet, gemessen werden, so wird, wenn durch Drehung de Doppelprismas im Sinne wachsenden Einfallswinkels γ der Grenzwinkel nac Massgabe des Brechungsindex der flüssigen Schicht erreicht ist, letztere (bei homogenem Lichte) vollkommen undurchsichtig. Da ν bekannt, α gemessen ist, s ergiebt sich β nach der Formel

$$\sin\beta = \frac{1}{\nu}\sin\alpha$$

r Grenzwinkel der Totalreflexion γ ergiebt sich

$$\gamma = \beta + w$$

d daraus der gesuchte Brechungsindex der Flüssigkeit n für das homogene Licht

$$n = \nu \cdot \sin\gamma.$$

Bezüglich der Abbe'schen Methode, für gewöhnliches gemischtes Licht die obachtungsweise brauchbar zu machen, so wie bezüglich der bei der Aushrung des Apparates zu beobachtenden Regeln und Vorsichten verweisen wir f das Original (ABBE, Neue Apparate zur Bestimmung des Brechungs- und Zereuungsvermögens fester Körper. Jena 1874, ferner auf HIRSCHBERG, Ophthalologische Studien, Separatabdruck aus dem Archiv für Augen- und Ohrenheilnde Bd. IV. Wiesbaden 1874).

Nach der sehr leichten und bequemen Abbe'schen Methode sind nun Unterchungen über die flüssigen Augenmedien (für die festen ist die Methode bisher cht angewendet) von FLEISCHER (SIGMUND FLEISCHER, Neue Bestimmungen der echungsexponenten der durchsichtigen flüssigen Medien des Auges. Inaug.-ss. Jena 1872) und HIRSCHBERG (l. c. und Med. Centralblatt 1874 No. 13) gecht worden. Nach FLEISCHER ist der Brechungsexponent des Kammerwassers n (nicht ganz frischen) menschlichen Augen im Mittel = 1,3373 (Maximum 3377, Minimum 1,3370), für Glaskörperflüssigkeit im Mittel 1,3367 (Maximum 3370, Minimum 1,3364), wenn der Brechungsexponent reinen Wassers 1,3340 bei 15° Celsius gefunden wurde.

HIRSCHBERG fand bei ganz frischen Augen im Mittel

für das Kammerwasser 1,337 (Max. 1,3379 — Min. 1,33705)
für den Glaskörper 1,336 (Max. 1,3379 — Min. 1,33541)

Die Resultate stimmen daher sehr gut mit den Zahlen von HELMHOLTZ, sind er erheblich geringer als die von KRAUSE.

Der Versuch, die Brechungsindices der nicht flüssigen Augenmedien nach m Abbe'schen Verfahren zu bestimmen, hat meinem Collegen, Herrn Professor MATTHIESSEN und mir recht befriedigende Resultate geliefert. Wir haben bisher sser an Thieraugen, nur an zwei Paar menschlicher Augen Bestimmungen ttelst des Abbe'schen Refractometers gemacht und folgende Zahlen für die Augen es funfzigjährigen Mannes und eines zweitägigen Kindes erhalten, indem der echungsexponent des Instrumentes für destillirtes Wasser 3310 ergab.

	Mann		Kind	
	I.	II.	I.	II.
Hornhaut	—	1,377	1,3721	—
Kammerwasser . . .	—	—	1,3383	—
Vordere Linsenkapsel .	—	—	1,3831	1,3780
Hintere – .	1,3374	1,3376	1,3503	1,3572
Aeussere Linsenschicht	1,3953	1,3967	1,3967 *)	—
Mittlere – .	1,4087	1,4067		
Kern der Linse . . .	1,4119	1,4093		
Glaskörper	—	1,3348	1,3340.	

*) Die Linse des Kindes war in ihren Schichten nicht verschieden. Wir behalten s weitere Untersuchungen vor und werden bald genaueres über dieselben mittheilen, nentlich auch über die Zuverlässigkeit der Bestimmungen und gewisse Vorsichtsssregeln.

3) ist nun noch eine Methode speciell für die Bestimmung des Brechung vermögens der Krystalllinse von Helmholtz (Physiol. Optik p. 79) angewend worden.

Für die Brechung der Krystalllinse kommt der Umstand in Betracht, dass d Schichten der Linse zunehmende Brechungsexponenten von der Oberfläche na dem Kerne zu haben. Senff (s. Volkmann, Art. Sehen, Handwörterbuch d Physiologie III. 1. p. 290) hat schon experimentell und theoretisch ermittelt, da die Krystalllinse wegen ihrer Schichtung stärker bricht, als wenn sie ganz und g aus der Kernsubstanz, ihrer am stärksten brechenden Substanz, zusammeng setzt wäre. Leider hat Senff nichts darüber veröffentlicht, und von seinen Unte suchungen theilt Volkmann (l. c.) nur folgendes mit: »Bei einer Ochsenlin wurde der Brechungsexponent 1,539 befunden, während der Brechungscoefficie der äusseren Schicht nur 1,374 und der des Kernes 1,453 war. An demselb Auge waren alle Dimensionen, Abstände und Krümmungshalbmesser, so wie d Brechungsexponenten der durchsichtigen Medien genau bestimmt worden, u als nun mit Zugrundelegung jener brechenden Kraft der Linse (1,539) die B rechnung des Ganges der Lichtstrahlen ausgeführt wurde, so wich der Ve einigungspunkt derselben nur um 0,1‴ von der Netzhaut ab, eine Grösse, welc unter den Beobachtungsfehlern liegt. Senff ist im Stande, diese ausserorden liche Sammelkraft der Linse auch theoretisch zu erklären. Er entwickelte ei Formel, welche er auf 6 in Bezug auf ihr Brechungsvermögen untersuchte Schic ten der Linse anwendete, und die Rechnung ergab eine Kraft von 1,541, was m der empirisch gefundenen von 1,539 in überraschender Weise zusammenstimmt Senff hat dieses Brechungsvermögen der Linse als totales Brechungsve mögen bezeichnet.

W. Zehender (Anleitung zum Studium der Dioptrik 1856) hat die bis 18 ermittelten Brechungsindices zusammengestellt p. 162—164, und die Rechnu für die Zunahme des totalen Brechungsindex der Linse ausgeführt unter der A nahme von nur drei Schichten, deren Brechungsindices von der Rinde na dem Kerne hin zunehmen von 1,3767 bis 1,3999 und gefunden (p. 66), dass d geschichtete Linse eine Brennweite von 11,3948 Linien, dagegen eine Linse m dem Brechungsindex 1,3999 eine Brennweite von 18,2297 haben würde; da ferner für eine Linse, welche aus gleichartiger Substanz bestände, für eine Bren weite von 11,395 Linien der Brechungsindex 1,43932 betragen müsste. Verg auch ibid. p. 184.

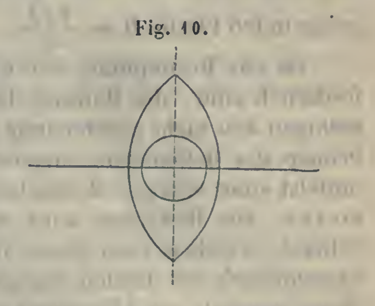
Helmholtz hat die Mittheilungen von Senff an Volkmann im wesentlich bestätigt und erwiesen, dass die Brennweite der Linse kürzer ist, als wenn s ganz und gar das Brechungsvermögen ihres Kernes hätte (l. c. p. 74), und zwei todten menschlichen Linsen das totale Brechungsvermögen = 1,4519 u 1,4414 gefunden, während er für die äussere Schicht nur 1,4189 erhalten hat.

Die Beobachtungen wurden von Helmholtz in der Weise ausgeführt, dass die Linsen in einen hohlen Messingcylinder legte, welcher oben und unten n einer Glasplatte bedeckt wurde und in der Mitte mit einem vorspringend Rande versehen war. Der Cylinder wurde mit Glaskörperflüssigkeit gefüllt, d vorsichtig von ihren Verbindungen gelöste Linse auf den vorspringenden Ra des Cylinders gelagert, bis zum Rande des Cylinders Glaskörperflüssigkeit dara gefüllt und die zweite plane Glasplatte darüber gelegt. Um mit dem horizont

tehenden Ophthalmometer beobachten zu können, setzte Helmholtz auf die obere
lasplatte ein rechtwinkliges Prisma, um das von unten kommende Licht hori-
ontal zu reflectiren. Das Ganze wird auf den Körper eines Mikroskops gesetzt,
us dem alle Gläser entfernt sind, und als optisches Object für die Krystalllinse
ine Messingplatte mit Gravesand'schen Schneiden bald auf den Objecttisch, bald
licht unter die untere Glasplatte des Kästchens gebracht. Zur Beleuchtung dient
er Spiegel des Mikroskops, zur Messung der Bilder, welche die Krystalllinse von
em Spalte zwischen den Gravesand'schen Schneiden entwirft, das Ophthal-
nometer (s. über dasselbe § 4). Gemessen ist dann die Grösse des Objectes,
ie Entfernungen desselben von der Linse, die Grösse der entworfenen Bilder
ei den verschiedenen Entfernungen des Objectes — bekannt sind ferner der
rechungsindex der Glaskörperflüssigkeit, die Dicke und der Brechungsexponent
er Glasplatten; endlich werden noch mittelst besonderer Messungen mit dem
phthalmometer die Krümmungsradien der vorderen und hinteren Krümmung
er Linse bestimmt (s. § 8 u. § 10). Bezüglich der Berechnung verweisen wir
uf Helmholtz (Physiologische Optik p. 80).

L. Hermann (Ueber schiefen Durchgang von Strahlenbündeln durch Linsen
nd über eine darauf bezügliche Eigenschaft der Krystalllinse) macht über den
Nutzen der Linsenschichtung folgende Betrach-
ung 1) in Bezug auf die optische Kraft der Linse:
enkt man sich die Linse als einen kugeligen
Kern von hohem Brechungsindex, schalenartig
mgeben von zwei concav-convexen Zerstreu-
ngslinsen (Figur 10) von geringerem Index, so
ompensirt die negative optische Kraft der letz-
eren einen Theil der positiven Kraft des Kernes.
Diese Compensation ist um so stärker, je höher
er Index der Schalen, und umgekehrt, mithin
ie Brennweite der Linse kleiner, wenn der In-
ex der Schalen kleiner ist als der des Kernes; 2) dass geschichtete Linsen mit
kugeligem Kern für schief durch ihre Mitte gehende Strahlenbündel bedeutend
essere Bilder geben, als homogene Linsen von gleicher Brennweite, so dass der
Bau der Linse das Auge für indirectes Sehen besonders befähigt. Für letzteren
Satz giebt Hermann den ausführlichen Beweis.

Fig. 10.



Wir können nun ohne Bedenken die über die Brechungsexponenten erhal-
tenen Werthbestimmungen nach Helmholtz dahin vereinfachen, dass wir die
Brechungsindices der Hornhaut, des Kammerwassers und der Glaskörperflüssig-
keit einander gleichsetzen, da die Differenzen in der That geringer sind, als die
individuellen Abweichungen in den einzelnen Theilen bei normalen Augen: die
brechenden Medien bilden dann nur eine Masse von gleichmässigem Brechungs-
vermögen, in welchem die Krystalllinse mit einem höheren Brechungsvermögen
eingeschaltet ist. Mit dieser Annahme wird die Bestimmung der sogenannten
Cardinalpunkte des Auges in vollkommen zulässiger Weise sehr erleichtert.
(s. § 11.)

Wir nehmen mit Listing und Helmholtz als Mittelzahl für Hornhaut, Kammer-
wasser und Glaskörper den Werth von 1,3376 für den Brechungsexponenten,
und für die Krystalllinse 1,4545 an.

Die Krümmungen der brechenden Flächen und ihre Distanzen von einander.

§ 4. **Die Krümmung der Hornhaut.** Die Bestimmung der Hornhautkrümmung ist deswegen von besonderer Wichtigkeit, weil die Differenz zwischen dem Brechungsvermögen der Luft und dem Brechungsvermögen der Hornhautsubstanz die grösste beim Auge in Betracht kommende ist und weil die Hornhautkrümmung die einzige, wie wir sehen werden, constante Krümmung der Augenmedien ist.

Die beste Methode zur Messung der Hornhautkrümmung am lebenden Auge ist für die Hornhaut zuerst von Thomas Young (Philos. Transactions 1801, p. 38) und in höchst vervollkommneter Weise von Helmholtz (A. f. O. I. 2. 1855 p. 3) für Hornhaut und Linse angewendet worden, und beruht auf der Messung der Spiegelbilder von leuchtenden Objecten, welche von den Oberflächen der Hornhaut und der Linse zurückgeworfen werden. Die Grösse der Spiegelbilder nimmt zu, wenn der Radius der brechenden Krümmung grösser wird, und umgekehrt, da die Brennweite eines Convexspiegels dem halben Radius desselben gleich ist. Aus der Grösse des gespiegelten Objectes b, dessen Entfernung von der spiegelnden Fläche a und der Grösse des Spiegelbildes β ergiebt sich dann der Radius der spiegelnden Fläche $R = \frac{2a\beta}{b}$.

Da zur Bestimmung der Grösse des Spiegelbildes β zwei Ablesungen erforderlich sind, die Haltung des Kopfes aber während der zu den Ablesungen nöthigen Zeit nicht gleichmässig genug ist, so construirte Helmholtz ein nach dem Princip des Heliometers eingerichtetes Instrument, mit welchem die Bildgrösse mittelst einer einzigen Beobachtung abgelesen werden kann, das **Ophthalmometer**. Die Bildgrösse wird mittelst des Ophthalmometers gefunden aus dem Winkel, welchen zwei ebene Glasplatten mit einander bilden, durch die eine Verschiebung der beiden Spiegelbilder um eine bestimmte Grösse bewirkt wird. Wenn nämlich ein Lichtstrahl unter einem Winkel auf eine planparallele Glasplatte auffällt, so wird er innerhalb der Glasplatte um einen von dem Brechungsexponenten des Glases abhängigen Winkel abgelenkt, setzt aber jenseits der Glasplatte seinen Weg parallel der ursprünglichen Richtung fort. Trifft er auf diesem Wege das beobachtende Auge, so erscheint diesem der leuchtende Punkt in der letzten, nicht in der ursprünglichen Richtung zu liegen. Der leuchtende Punkt oder das Object erscheint also um eine gewisse Grösse verschoben. Wird durch eine zweite Glasplatte das Object um die gleiche Grösse, aber in entgegengesetzter Richtung verschoben, so wird man den Objecten eine solche Grösse geben können, dass die Verschiebung derselben z. B. ihrer eigenen Grösse gleich ist, also etwa die Punkte a und b so verschoben werden, dass von dem einen der Doppelbilder der Punkt a'' mit dem Punkte b' zusammenfällt, wie in Figur 11

Fig. 11.

a b

a' a'' b' b''

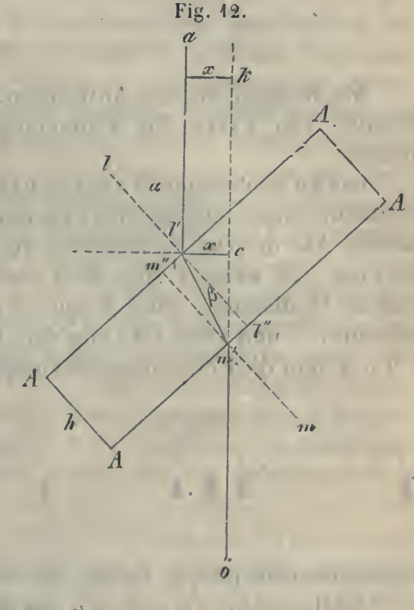
Ist ab unbekannt, die Grösse der bewirkten Verschiebung aber bekannt, so ergiebt sich aus der Verschiebung die Grösse ab, denn der Punkt a ist um die Hälfte der Distanz ab nach links, der Punkt b um die Hälfte der Distanz ab nach rechts verschoben worden.

Das Ophthalmometer ist ein Stubenfernrohr, vor dessen Objectiv zwei planparallele Glasplatten über einander in Messingfassungen so angebracht sind, dass ihre freien Ränder genau in der verlängerten Axe des Fernrohrs, welches horizontal liegt, sich berühren und die beiden Platten sich um verticale Axen durch ein Räderwerk so drehen lassen, dass wenn die eine Glasplatte nach links gedreht wird, die andere um einen gleichen Winkel sich nach rechts dreht. Die Grösse der Drehung wird an einer Kreistheilung abgelesen und damit der Winkel gefunden, welchen die beiden Platten mit einander bilden. Da die beiden Glasplatten sich in möglichster Nähe des Objectivs befinden, so erscheinen die von einem Objecte entworfenen beiden Bilder gleichzeitig in dem Gesichtsfelde des Fernrohrs neben einander. Die Einstellung der Glasplatten ist beendet, wenn die beiden Bilder in bestimmter, willkürlich festzusetzender Lage, z. B. so, wie in Figur 11 erscheinen. Aus der Winkelstellung der planparallelen Glasplatten kann man dann die Bildgrösse berechnen, wenn man den Brechungsindex und die Dicke der Glasplatten kennt.

Die seitliche Verschiebung des Bildes von einem leuchtenden Punkte berechnet Helmholtz in folgender Weise: ist in Figur 12 $AAAA$ die Glasplatte, $l'l'' = h$ die Dicke derselben, al' der einfallende, $l'm'$ der gebrochene, $m'o$ der austretende Strahl, ferner ll'' und mm'' die Einfallslothe, α der Einfalls-, β der Brechungswinkel, so wird der rückwärts verlängerte austretende Strahl $om'k$ parallel mit al', aber um die Distanz x seitlich verschoben sein und in der Linie $om'k$ der leuchtende Punkt a zu liegen scheinen. Die Grösse der scheinbaren seitlichen Verschiebung x ist aber $= l'm' \cdot \sin l'm'c$, ferner $l'm' = \frac{l'l''}{\cos\beta} = \frac{h}{\cos\beta}$, Winkel $l'm'c = \alpha - \beta$ und daraus

$$x = \frac{h \cdot \sin(\alpha - \beta)}{\cos\beta}.$$

Fig. 12.



Winkel α ist durch die Anordnung des Versuches gegeben, β findet sich aus $\sin\alpha = n \cdot \sin\beta$, wenn n, der Brechungsexponent des Glases, bekannt ist (oder wird durch besondere Messungen an einem Maassstabe bestimmt für ein gegebenes Instrument).

Da endlich nach der Construction des Apparates die Ablenkung durch zwei Platten in entgegengesetzter Richtung geschieht, so ist x doppelt zu nehmen für das Ophthalmometer. Hat man die Bilder zweier beobachteter Punkte, wie a und

b in Figur 11, auf einander eingestellt, so ist die Entfernung E (in Figur 11 $a' b''$) $= 2x$ oder

$$E = 2x = \frac{2h \cdot \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad 1)$$

Die ausführliche Beschreibung des Ophthalmometers, wie es von Meyerstein vervollkommnet ist und von ihm angefertigt wird, findet man namentlich bei Woinow (Ophthalmometrie, Wien 1871, p. 18). — Die Prüfung des Ophthalmometers ist besprochen in III, 1, p. 206 dieses Handbuches.

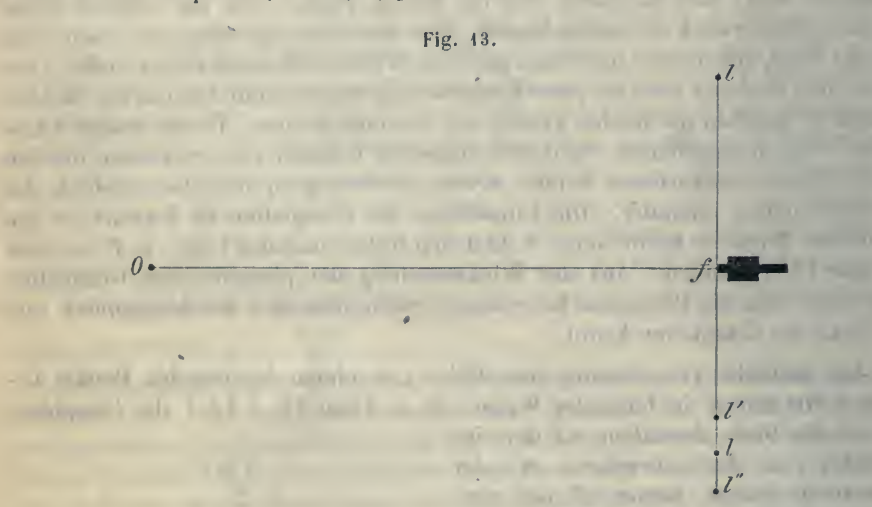


Fig. 13.

Als Beispiel für die Anwendung des Ophthalmometers möge die folgende Messung von Knapp (Die Krümmung der Hornhaut, Heidelberg 1860, p. 13) dienen:

Das zu beobachtende Auge O fixirt bei festgestelltem Kopfe ein dicht vor dem Ophthalmometer aufgestelltes Fadenkreuz f in Figur 13, so dass die Gesichtslinie mit der Axe des Ophthalmometers zusammenfällt; diese Linie ist senkrecht gegen die Linie, in welcher sich die 3 leuchtenden Punkte $l\,l'\,l''$ befinden (3 helle und schmale Gasflammen, oder 3 Spiegel (Woinow), welche das Bild einer Gasflamme reflectiren); und zwar sei l von dem Fusspunkte a entfernt 0,5 Meter, l' 0,4 M., l'' 0,6 M. und die Entfernung des Fusspunktes a von dem Auge O betrage 2,12 M. — Die Ophthalmometerplatten werden nun so gedreht, dass das Spiegelbild der Hornhaut von l genau zwischen den Hornhautreflexbildern von l' und l'' liegt, wie in Figur 13 b.

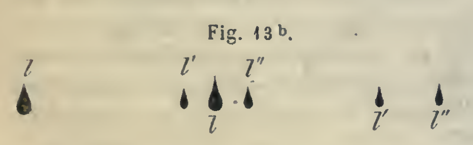


Fig. 13 b.

Die Winkelverschiebung der Ophthalmometerplatten beträgt 30° 58′, wie die Ablesung an der Kreistheilung des Ophthalmometers ergiebt; der Brechungsindex n der Platten ist gefunden $= 1{,}5320$, die Dicke der Platten $h = 4{,}4105$ Mm. Der Winkel α ist also $= 30° 58'$, der Winkel $\beta = 19° 38'$, daher

$$\mathrm{E} = \frac{2h \cdot \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} = \frac{2 \cdot 4{,}4105 \text{ Mm.} \sin 11° 20'}{\cos 19° 38'} = 1{,}8405 \text{ Mm.}$$

Wir können nun bei der Entfernung der leuchtenden Flammen vom Auge = 2120 Mm. das Bild derselben als im Brennpunkte der convexen spiegelnden Hornhautfläche liegend betrachten; die Grösse des Objectes, welches wir b nennen, ist nach den gegebenen Entfernungen der Flammen von einander = 1000 Mm.; die Grösse des Bildes $\beta = E$ verhält sich zu b, wie ihre Entfernungen von der spiegelnden Hornhautfläche; setzen wir die Entfernung von $b = a$, für $\beta =$ der Brennweite $= \frac{1}{2}R$, so findet sich

$$R = \frac{2a \cdot \beta}{b} = \frac{2 \cdot 2120 \text{ Mm.} \cdot 1,8405 \text{ Mm.}}{1000 \text{ Mm.}} = 7,8016 \text{ Mm.}$$

Damit würde also der Krümmungsradius der Hornhaut im horizontalen Meridiane des Auges für das um die Gesichtslinie herum gelegene Hornhautstück bestimmt sein, unter der Annahme, dass dasselbe eine wirkliche Kugelfläche ist. Nach der von Helmholtz eingeführten Bezeichnungsweise ist der gefundene Radius $= \varrho_0$.

Diese eine Bestimmung genügt indess nicht zur Bestimmung der gesammten Oberflächenkrümmung der Hornhaut, denn 1) sind unbestimmt gelassen die Krümmungshalbmesser in anderen Meridianen; 2) ist die Annahme, dass die Krümmung der Hornhaut im horizontalen Meridian eine Kugelfläche sei, wenn sie für das kleine Stück, dessen Bild gemessen worden ist, auch erlaubt war, nicht gültig für die ganze Hornhaut; 3) ist unbestimmt gelassen, ob eine um den Scheitelpunkt der Hornhaut, oder eine um einen anderen Punkt gelegene Fläche der Hornhaut das gemessene Bild reflectirt hat.

Es sind also weitere Bestimmungen über die Hornhautkrümmung zu gewinnen durch Messung der Bilder, welche von anderen Hornhautpunkten reflectirt werden, und die Berechnung der Hornhautkrümmung wird um so genauer sein, je grösser die Anzahl der gemessenen Stücke ist. Die Messung der Bilder von anderen Hornhautstellen ist leicht herzustellen dadurch, dass das beobachtete Auge andere Punkte, als den in der Axe des Ophthalmometers gelegenen Punkt fixirt: die Axe des Ophthalmometers und die Verbindungslinie zwischen dem Auge und dem fixirten Punkte, d. h. die Gesichtslinie schliessen dann einen Winkel von leicht zu bestimmender Grösse ein. Bezeichnen wir die Krümmungshalbmesser, die für solche Punkte gefunden werden, mit $\varrho_1, \varrho_2, \varrho_3 \dots$, so müssten diese alle $= \varrho_0$ gefunden werden, wenn die Oberfläche der Hornhaut eine Kugelfläche ist. Das ist nun nicht der Fall: für den Krümmungsradius ϱ_1 in einem Abstande von 21°51′ von der Gesichtslinie medianwärts (nach der Nasenseite hin) fand Knapp $\varrho_1 = 8,4715$ Mm. für ϱ_2 in gleichem Abstande lateralwärts (nach der Schläfenseite hin) $\varrho_2 = 8,0136$ Mm. Es waren hierzu Punkte fixirt, welche in der Linie der leuchtenden Punkte l, l', l'' 0,85 M. von dem Fusspunkte a der Axe des Ophthalmometers entfernt waren, also im horizontalen Meridiane des Auges gelegen.

Es geht aus den Werthen für ϱ_0, ϱ_1, ϱ_2 hervor: 1) dass die Krümmung der Hornhaut keine Kugelfläche sein kann; 2) da ϱ_1 nicht gleich ϱ_2 gefunden wurde, dass die Gesichtslinie nicht durch den Scheitelpunkt der Hornhautkrümmung geht.

Wenn wir voraussetzen, dass die Krümmung der Hornhautmeridiane überhaupt eine regelmässige ist, so würde dieselbe eine hyperbolische, parabolische oder elliptische sein können: die letztere Annahme ist die wahrscheinlichste.

Zur Berechnung des Krümmungsradius ϱ eines beliebigen Punktes der Ellips ist zu kennen: der Winkel zwischen dem Krümmungsradius und der grosse Axe der Ellipse $= \omega$, die grosse Axe $= 2a$, der Abstand der Brennpunkt welcher, dividirt durch die grosse Axe, die numerische Excentricität $= \varepsilon$ gieb (Helmholtz, A. f. O. I, 2. p. 19. Knapp, l. c. p. 17. Woinow, l. c. p. 40 Dann ist

$$\varrho = \frac{a\,(1 - \varepsilon^2)}{\sqrt[3]{(1 - \varepsilon^2 \,.\, \sin^2\omega)}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad \mathrm{I}$$

Aus den 3 Krümmungsradien ϱ_0, ϱ_1, ϱ_2 lässt sich zunächst der Winkel (zwischen dem Krümmungsradius und der grossen Axe) der allgemeinen Gleichun bestimmen. Da ϱ_0 mit der Gesichtslinie und der Axe des Ophthalmometers zu sammenfällt, ϱ_1 und ϱ_2 mit der Gesichtslinie zusammenfallen, aber mit der Ax des Ophthalmometers einen Winkel von 21°51′ bilden, den wir mit φ bezeichne und welcher, da er für ϱ_1 auf der anderen Seite von der Gesichtslinie liegt, a für ϱ_2, daher für $\varrho_1 = +\,\varphi$, für $\varrho_2 = -\,\varphi$ ist, so werden wir, indem wir de unbekannten Winkel, welchen ϱ_0 mit der grossen Axe der Ellipse bildet, mit bezeichnen, dann für die Winkel, welche ϱ_1 und ϱ_2 mit der grossen Axe bilde zu setzen haben $\alpha + \varphi$ bezw. $\alpha - \varphi$. Dann lautet die Gleichung für

$$\left.\begin{aligned} \varrho_0 &= \frac{a\,(1 - \varepsilon^2)}{\sqrt[3]{(1 - \varepsilon^2 \cdot \sin^2\alpha)}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ \varrho_1 &= \frac{a \cdot (1 - \varepsilon^2)}{\sqrt[3]{\left(1 - \varepsilon^2 \cdot \sin^2(\alpha + \varphi)\right)}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \\ \varrho_2 &= \frac{a \cdot (1 - \varepsilon^2)}{\sqrt[3]{\left(1 - \varepsilon^2 \cdot \sin^2(\alpha - \varphi)\right)}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \end{aligned}\right\} \quad \mathrm{II}$$

Aus diesen 3 Gleichungen lässt sich zunächst a eliminiren: erhebt man di beiden ersten Gleichungen auf die zweite Potenz und zieht die Kubikwurzel au so hat man

$$\varrho_0^{\frac{2}{3}} = \frac{a^{\frac{2}{3}}\,(1 - \varepsilon^2)^{\frac{2}{3}}}{1 - \varepsilon^2 \sin^2\alpha}$$

$$\varrho_1^{\frac{2}{3}} = \frac{a^{\frac{2}{3}}\,(1 - \varepsilon^2)^{\frac{2}{3}}}{1 - \varepsilon^2 \cdot \sin^2(\alpha + \varphi)} \text{ und daraus}$$

$$\varrho_0^{\frac{2}{3}} - \varrho_0^{\frac{2}{3}} \cdot \varepsilon^2 \cdot \sin^2\alpha = \varrho_1^{\frac{2}{3}} - \varrho_1^{\frac{2}{3}}\,\varepsilon^2 \cdot \sin^2(\alpha + \varphi), \text{ woraus}$$

$$\varrho_0^{\frac{2}{3}} - \varrho_1^{\frac{2}{3}} = \varepsilon^2 \left(\varrho_0^{\frac{2}{3}} \cdot \sin^2\alpha - \varrho_1^{\frac{2}{3}} \cdot \sin^2(\alpha + \varphi)\right) \text{ also}$$

$$\varepsilon^2 = \frac{\varrho_0^{\frac{2}{3}} - \varrho_1^{\frac{2}{3}}}{\varrho_0^{\frac{2}{3}} \cdot \sin^2\alpha - \varrho_1^{\frac{2}{3}} \cdot \sin^2(\alpha + \varphi)}$$

Auf gleiche Weise erhält man aus der ersten und dritten Gleichung III)

$$\varepsilon^2 = \frac{\varrho_0^{\frac{2}{3}} - \varrho_2^{\frac{2}{3}}}{\varrho_0^{\frac{2}{3}} \sin^2\alpha - \varrho_2^{\frac{2}{3}} \sin^2(\alpha - \varphi)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad \mathrm{IV}$$

Aus diesen beiden Gleichungen für ε^2 lässt sich nun $\angle\,\alpha$ bestimmen: setze wir die Gleichungen der rechten Seiten einander gleich, schaffen die Nenner au die anderen Seiten, führen die Multiplication aus und setzen zur Abkürzun $(\varrho_0\,\varrho_1)^{\frac{2}{3}} = A$, $(\varrho^0\,\varrho_2)^{\frac{2}{3}} = B$ und $(\varrho_1\,\varrho_2)^{\frac{2}{3}} = C$, so erhalten wir

$$B \cdot \sin^2\alpha - A\,\sin^2\alpha = B \cdot \sin^2(\alpha - \varphi) + C\,\sin^2(\alpha + \varphi) - C \cdot \sin^2(\alpha - \varphi)$$
$$- A\,\sin^2(\alpha + \varphi)$$

was wir auch schreiben können

$$C\left[\sin^2(\alpha+\varphi)-\sin^2(\alpha-\varphi)\right]=B\left[\sin^2\alpha-\sin^2(\alpha-\varphi)\right]$$
$$+A\left[\sin^2(\alpha+\varphi)-\sin^2\alpha\right].$$

Da aber die Differenz der Quadrate der Sinus zweier Winkel gleich ist dem Producte aus dem Sinus der Summe der beiden Winkel in den Sinus der Differenz der beiden Winkel, also

$$\sin^2(\alpha+\varphi)-\sin^2(\alpha-\varphi)=\sin\big((\alpha+\varphi)+(\alpha-\varphi)\big)\cdot\sin\big((\alpha+\varphi)-(\alpha-\varphi)\big)$$
$$=\sin 2\alpha\cdot\sin 2\varphi$$

so wird

$$C\cdot\sin 2\alpha\cdot\sin 2\varphi=B\cdot\sin(2\alpha-\varphi)\cdot\sin\varphi+A\cdot\sin(2\alpha+\varphi)\sin\varphi$$

Da aber $\sin 2\varphi = 2\sin\varphi\cdot\cos\varphi$ ist, so können wir setzen:

$$C\sin 2\alpha\cdot 2\sin\varphi\cdot\cos\varphi=B\cdot\sin(2\alpha-\varphi)\sin\varphi+A\cdot\sin(2\alpha+\varphi)\sin\varphi$$

und wenn wir auf beiden Seiten mit $\sin\varphi$ dividiren:

$$2C\cdot\sin 2\alpha\cdot\cos\varphi=B\cdot\sin(2\alpha-\varphi)+A\sin(2\alpha+\varphi)$$

Da ferner $\sin(\alpha+\varphi)$ sich auflöst in $\sin\alpha\cos\varphi+\cos\alpha\sin\varphi$ und entsprechend $\sin(\alpha-\varphi)$, so bekommen wir, wenn wir ausserdem mit $\cos 2\alpha\cdot\cos\varphi$ dividiren

$$2C\cdot\frac{\sin 2\alpha\cdot\cos\varphi}{\cos 2\alpha\cdot\cos\varphi}=\frac{B(\sin 2\alpha\cdot\cos\varphi-\cos 2\alpha\cdot\sin\varphi)+A(\sin 2\alpha\cos\varphi+\cos 2\alpha\sin\varphi)}{\cos 2\alpha\cdot\cos\varphi}$$

oder

$$2C\cdot\tan 2\alpha=B\cdot\tan 2\alpha-B\tan\varphi+A\tan 2\alpha+A\tan\varphi$$
$$=(A+B)\tan 2\alpha+(A-B)\tan\varphi$$

oder: $$\tan\varphi\,(B-A)=(A+B-2C)\tan 2\alpha$$

woraus $\tan 2\alpha=\dfrac{\tan\varphi\,(B-A)}{A+B-2C}$

und wenn wir für A, B, C ihre ursprünglichen Werthe einsetzen:

$$\tan 2\alpha=\frac{\tan\varphi\left[(\varrho_0\varrho_2)^{\frac{2}{3}}-(\varrho_0\varrho_1)^{\frac{2}{3}}\right]}{(\varrho_0\varrho_1)^{\frac{2}{3}}+(\varrho_0\varrho_2)^{\frac{2}{3}}-(\varrho_1\varrho_2)^{\frac{2}{3}}}\quad\ldots\ldots\quad \text{V)}$$

Da sämmtliche Werthe auf der rechten Seite der Gleichung bekannt sind, so ergiebt sich aus den angegebenen Werthen ($\varphi = 21°51'$, $\varrho_0 = 7{,}8016$, $\varrho_1 = 8{,}4715$, $\varrho_2 = 8{,}0136$) der Winkel $\alpha = 5°41'$, als Abweichung der Gesichtslinie von der grossen Axe der Hornhautellipse.

Durch Einsetzung des Werthes von α in die Gleichung IV) findet sich $\varepsilon^2 = 0{,}26148$ und endlich durch Einsetzung dieses Werthes in eine der Gleichungen III) der Werth für die halbe grosse Axe der Hornhautellipse $a = 10{,}523$ Mm.

Die halbe kleine Axe $b = a\sqrt{(1-\varepsilon^2)}$ berechnet sich $= 9{,}0431$ Mm.
die lineare Excentricität $c = a\cdot\varepsilon$ - - $= 5{,}3809$ Mm.

Bei der Bestimmung des Krümmungsradius im Scheitel der Ellipse $= \varrho$ (cf. II) haben wir den Winkel $\omega = o$, weil der Krümmungsradius mit der grossen Axe zusammenfällt, mithin

$$\varrho = a\,(1-\varepsilon^2)$$

Da $\varepsilon = \dfrac{c}{a}$ und $b^2 = a^2 - c^2$, so kann man auch ϱ aus der Formel

$$\varrho = \frac{b^2}{a}\quad\ldots\ldots\quad \text{VI)}$$

berechnen und findet ϱ, d. h. den Krümmungsradius im Scheitel der Ellipse $\varrho = 7{,}7703$ Mm.

Damit ist die Form der Hornhautkrümmung im horizontalen Meridiane bestimmt, zunächst für das eine individuelle Auge.

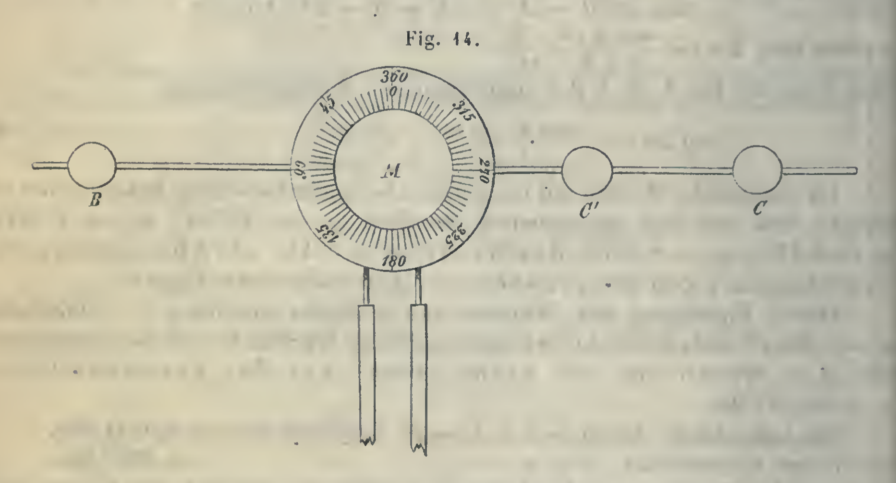
In entsprechender Weise würden andere Meridiane der Hornhaut zu messen und zu berechnen sein.

Die Krümmung des verticalen Meridians ist zuerst von SENFF, dann mittelst des Ophthalmometers zuerst von KNAPP (l. c. p. 22) bestimmt worden; von letzterem Forscher in der Weise, dass die Stellung des ganzen Apparates unverändert blieb, und nur der Kopf des Beobachteten eine horizontale statt der aufrechten Stellung annahm, die Verbindungslinie der beiden Augenmittelpunkte (Grundlinie) also vertical war.

Von dieser Methode KNAPP's ist DONDERS (Die Anomalien der Refraction und Accommodation, Deutsche Ausgabe von O. BECKER, Wien 1866) abgegangen, indem er die Haltung des Kopfes unverändert liess, dagegen die Linie der leuchtenden Objecte aus der Horizontalen schräg oder vertical stellte. Er bediente sich dazu des sogenannten Middelburg'schen Ringes (MIDDELBURG de Zitplaats van het Astigmatisme, Utrecht 1863), welcher in III, 1 dieses Handbuchs p. 208 Fig. 59 abgebildet ist. Dieser Apparat wurde verbessert durch WOINOW, welcher statt der Flammen am Middelburg'schen Ringe Spiegel an einer geraden Stange, welche um einen Ring gedreht und eingestellt werden konnte, anbrachte und von den Spiegeln das Bild einer Flamme reflectiren liess.

In Figur 14 ist WOINOW's Spiegelapparat dargestellt: die Spiegel B, C', C entsprechen den Flammen l, l', l'' in Figur 13, das Ophthalmometer befindet sich

Fig. 14.



in der Oeffnung M der Kreistheilung, deren Mittelpunkt in der Axe des Ophthalmometers liegt; die Stange mit den Spiegeln kann in beliebigen Graden des Ringes eingestellt werden, entsprechend den zu untersuchenden Meridianen des Auges.

In der folgenden Tabelle sind die Werthe zusammengestellt, welche SENFF, HELMHOLTZ und KNAPP durch Messung und Rechnung erhielten; die Buchstaben über den Columnen sind aus dem vorhergehenden verständlich.

Tabelle I. Horizontaler Meridian.

		ϱ_0	ϱ	a	b	α
ENFF	I. . . .		7,794	10,435	9,019	2° 54′
ELM-OLTZ	II. . . .		7,646	10,100	8,788	6° 43′
	III. . . .	. . . .	7,338	13,027	9,777	4° 19′
	IV. . . .	. . . .	8,154	11,711	9,772	7° 35′
NAPP	V. . . .	7,801	7,770	10,523	9,043	5° 41′
	VI. . . .	8,066	8,030	10,875	9,344	6° 5′
	VII. . . .	7,230	7,165	8,602	7,850	10° 55′
	VIII. . . .	7,218	7,205	10,134	8,545	3° 41′
	IX. . . .	7,740	7,520	12,763	9,797	7° 27′
	Mittel	7,611	7,625	10,908	9,105	6° 9′

Verticaler Meridian.

		ϱ_0	ϱ	a	b	α
ENFF	Ia . . .		7,796	9,452	8,583	3° 36′
	Ib . . .		7,746	11,243	8,344	1° 36′
NAPP	V. . . .	7,906	7,854	11,495	9,501	— 4° 2′
	VI. . . .	8,257	8,255	11,629	9,794	1° 4′
	VII. . . .	7,385	7,270	7,570	7,419	— 14° 52′
	VIII. . . .	7,078	7,077	11,385	8,771	— 1° 0′
	IX. . . .	7,712	7,611	9,301	8,813	5° 29′
	Mittel	7,668	7,659	10,297	8,746	— 1° 9′

Von den Werthen in der Tabelle weichen die von anderen Beobachtern ge-
undenen Zahlen nicht wesentlich ab: so fanden Donders und Doyer in 15 Fällen
ir ϱ_0 horizontal im Mittel 7,76 für ϱ_0 vertical 7,73 Mm. — doch war bei ihnen
ur 3 Mal der Radius für den horizontalen Meridian kleiner, als für den verticalen
eridian (Donders, Refractionsanomalien p. 389); Knapp fand in 16 anderen
ällen (A. f. O. VIII. 2, p. 215) den horizontalen Meridian der Hornhaut schwächer
ekrümmt, als den verticalen; Reuss und Woinow (Ophthalmometrische Studien,
Vien 1869, p. 55) fanden in vier Fällen im Mittel 7,5 für ϱ_0. — Dieselben fanden
ir Winkel α — 2°38′, + 1°19′, 2°23′, 4°6′, 4°15′, 4°54′ und 7°13′; Mandel-
tamm (A. f. O. XI. 2, p. 265) und Mauthner (Wiener Med. Presse 1869 Nr. 34—37)
nden ähnliche Werthe, nur zum grössten Theil, namentlich für den verticalen
eridian, erheblich kleiner.

Es geht aus diesen Messungen hervor: 1) dass sowohl der horizontale, als
uch der verticale Meridian der vorderen Hornhautoberfläche elliptische
urven sind, — 2) dass die Form der Ellipse für den horizontalen Meridian
ets eine andere ist, als für den verticalen Meridian, — 3) die grosse Axe
er Ellipse fällt nicht zusammen mit der Gesichtslinie, vielmehr
eicht die Gesichtslinie constant medianwärts von dem vorderen Pole der Horn-
autaxe ab, aber bald nach oben, bald nach unten. — Ueber die Bestimmung
es Winkels α s. III. 1 dieses Handbuchs p. 210. Wir wollen hier nur bemerken,
ass Knapp den Winkel zwischen der Hornhautaxe und der Blicklinie (Verbin-
ungslinie von Fixirpunkt und Drehpunkt des Augapfels) gemessen hat, welcher
on Reuss und Woinow (l. c. p. 54) als Winkel α' bezeichnet wird, während der
Vinkel α zwischen Hornhautaxe und Gesichtslinie (Verbindungslinie zwischen

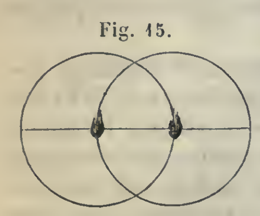
Fixirpunkt und hinterem Knotenpunkte) liegt. Die Differenz zwischen α und α ist aber sehr gering und beträgt etwa $2\frac{2}{6}$, also für 1° etwa $1\frac{1}{2}'$.

4) Die elliptische Abweichung von der Kugel steht in keiner Beziehung zu der Winkelgrösse von Gesichtslinie und Ellipsenaxe.

5) Die grössten Differenzen zwischen den Krümmungen verschiedener Meridiane liegen keineswegs immer im verticalen und horizontalen Meridiane, sondern können in jedem anderen Meridiane liegen. Eine Reihe von Untersuchungen hierüber haben namentlich Donders, Middelburg und Hamer (Donders, Refractionsanomalien p. 393) ausgeführt im Zusammenhange mit Donders' Untersuchungen über den Astigmatismus (s. § 18).

§ 5. **Hornhautbasis und Hornhauthöhe. Innere Hornhautfläche.** Es ist noch erforderlich die Lage der Hornhautbasis zur Hornhautaxe, zur Gesichtslinie und zum Hornhautscheitel zu bestimmen. Nach den Messungen von Helmholtz (A. f. O. I. 2 p. 30) und Knapp (Krümmung der Hornhaut 186. p. 30) kann man im horizontalen Meridian den Mittelpunkt der Hornhaut mit dem Scheitelpunkte derselben als zusammenfallend ansehen und findet den Durchmesser der Hornhautbasis etwa = 12 Mm. Die Bestimmung geschieht in der Weise, dass dicht an der Axe des Ophthalmometers ein leuchtender Punkt, etwa eine kleine Flamme, angebracht wird, welche auf der Hornhaut ein Spiegelbild entwirft; der zu fixirende Punkt erhält eine solche Lage, dass das Doppelbild des leuchtenden Punktes beide Hornhautränder deckt wie in Figur 15. — Aus dem Perpendikel vom fixirten Punkte auf die Richtungslinie des Ophthalmometers und der Entfernung des Auges von dem Fusspunkte dieser Senkrechten auf die Richtungslinie ergiebt sich die Tangente des Winkels, welchen die Gesichtslinie mit dem Krümmungsradius der Hornhautmitte bildet, welchen Helmholtz und Knapp mit α_1 bezeichnen; zugleich ergiebt sich aus dem Winkel, welchen die Ophthalmometerplatten bilden, die Grösse des Durchmessers der horizontalen Hornhautbasis. Da ferner der Mittelpunkt der Hornhaut mit dem Scheitelpunkte der horizontalen Ellipse nahezu zusammenfällt und die Ränder der Hornhaut gleich weit von demselben entfernt sind, mithin der Durchmesser der Hornhautbasis senkrecht auf der Axe der grossen Ellipse steht, so lässt sich daraus zugleich die Hornhauthöhe, d. h. die Entfernung der Basis vom Scheitel berechnen.

Fig. 15.



Die beiden Axen der Hornhautellipse sind nämlich die Axen eines rechtwinkligen Coordinatensystems auf der Mitte der Ellipse, und wenn wir mit y die Ordinate des Randpunktes der Hornhaut (gleich dem halben Durchmesser der Basis), mit x die Abscisse desselben bezeichnen, so ist aus der allgemeinen Coordinatengleichung der Ellipse

$$a^2 y^2 + b^2 x^2 = a^2 b^2$$

für unsern Fall

$$x^2 = \frac{a^2 (b^2 - y^2)}{b^2}$$

woraus

$$x = \pm \frac{a}{b} \sqrt{(b^2 - y^2)} \quad \ldots \ldots \quad \text{VII}$$

$a - x$ ist dann die Hornhauthöhe $= H$.

Wir stellen in der folgenden Tabelle II die in dieser Weise von Helmholtz ınd von Knapp gefundenen Werthe für die Abweichung der Gesichtslinie (Blicklinie) von der grossen Axe der horizontalen Ellipse, unter α', für die Abweichung ler Gesichtslinie (Blicklinie) von dem Krümmungsradius der Hornhautmitte unter α_1, ferner die Durchmesser der Hornhautbasis und die Hornhauthöhen zusammen.

Tabelle II.

		α'	α_1	Dm. der Basis.	Hornhaut-höhe.
Helmholtz	II.	4° 19′	4° 51′	11,640	2,560
	III.	6° 43′	6° 21′	11,640	2,531
	IV.	7° 35′	7° 9′	12,092	2,511
Knapp	V.	5° 41′	5° 7′	12,120	2,712
	VI.	6° 5′	6° 12′	12,194	2,634
	VII.	[10° 55′	6° 44′]	11,717	2,811
	VIII.	3° 41′	4° 1′	11,356	2,561
	IX.	7° 27′	5° 52′	12,894	3,152
	Mittel (ohne VII)	6° 4′	5° 39′	11,957	2,684

Es wäre nun weiter die Krümmung der inneren Hornhautfläche zu bestimmen, indess ist die Kenntniss derselben bei dem jetzigen Stande der Untersuchung nicht von Wichtigkeit, weil das Brechungsvermögen der Hornhautsubstanz nur wenig von dem der wässerigen Flüssigkeit in der vorderen Augenkammer differirt (s. § 3). Mittelst eines Spiegelbildes lässt sich die Krümmung ler innern Hornhautfläche nicht bestimmen, da dasselbe eben wegen der geringen Differenz des Brechungsvermögens von Hornhautsubstanz und Kammerwasser u lichtschwach ist, um gesehen werden zu können. Helmholtz (A. f. O. I. 2, . 26) hat die Krümmung zu finden gesucht an todten Augen, indem er an Querchnitten der Hornhaut die Dicke derselben mass. Nach diesen Messungen ist die Dicke der Hornhaut in ihren beiden mittleren Vierteln fast die gleiche und nimmt rst gegen den Rand hin stark zu. Helmholtz fand die Hornhaut in der Mitte

	1,37	Mm. dick
leichweit von Mitte und Rand	1,39	- -
am Rande	1,55	- -

)a die Randzone wegen der Abblendung der Strahlen durch die Iris kaum in Betracht kommt, so können wir sie als ziemlich gleich dick, mithin die innere Krümmungsfläche parallel der äusseren setzen — was um so weniger in Betracht ommt, wenn wir mit Helmholtz die Hornhaut und das Kammerwasser als eine lasse von gleichem Brechungsvermögen ansehen.

Da sich ferner der Brechungsindex der wässerigen Feuchtigkeit von dem des Glaskörpers fast gar nicht unterscheidet (s. § 3), so können wir unsere Vortellung von den brechenden Augenmedien noch dahin vereinfachen, dass wir, ei Ausschluss der Krystalllinse, die sämmtlichen brechenden ledien des Augapfels als homogen ansehen, und ihren Brechungsndex = 1,3376 setzen.

§ 6. Brennweiten des Hornhautsystems. Wir sind nun im Stande, ie Brennweiten des Hornhautsystems zu berechnen. Wir machen zur weiteren

Vereinfachung noch die Annahme, dass die Hornhaut in ihrem mittleren Theil kuglig gekrümmt sei, und setzen ihren Krümmungshalbmesser (zunächst für den horizontalen Meridian) $= \varrho$ (s. Tabelle I in § 4).

Wir haben dann für Strahlen, welche parallel zur Axe die Hornhaut treffen die Vereinigungsweite derselben vor der Hornhaut in der Luft, d. h. die vordere Brennweite nach 4ª) $= F_{,} = \frac{n_1 r}{n_2 - n_1}$, also für unsern Fall $F_{,} = \frac{\varrho}{n-1}$; und entsprechend für die Vereinigung von in der Luft parallelen Strahlen hinter dem Hornhautscheitel oder die hintere Brennweite des Hornhautsystems

$$F_{,,} = \frac{n \cdot \varrho}{n-1}.$$

Daraus berechnen sich für die von Helmholtz und Knapp untersuchten Augen, wenn $n = 1,3376$ gesetzt wird, folgende Brennweiten für die horizontalen und verticalen Meridiane

Tabelle III.

		Vordere Brennweite $F_{,}$.			Hintere Brennweite $F_{,,}$.		
		H. M.	V. M.	Dffz.	H. M.	V. M.	Dffz.
Helmholtz	II.	22,632			30,278		
	III.	21,720			29,058		
	IV.	24,136			32,290		
Knapp	V.	22,999	23,248	0,249	30,769	31,102	0,333
	VI.	23,768	24,435	0,667	31,800	32,690	0,890
	VII.	21,208	21,519	0,311	28,373	28,789	0,416
	VIII.	21,327	20,948	— 0,379	28,531	28,024	— 0,507
	IX.	22,259	22,528	— 0,269	29,779	30,139	— 0,360
	Mittel	22,506	22,535		30,190	30,144	

Aehnliche Zahlen hat Donders für die hintere Brennweite $F_{,,}$ nach seinen und Doyer's Messungen berechnet und namentlich bei fast allen Augen Differenzen für den horizontalen und verticalen Meridian gefunden. (Refractionsanomalien p. 388.)

Für ein Auge ohne Krystalllinse (für ein aphakisches Auge) würde also der hintere Brennpunkt etwa 28 Mm. bis 32 Mm. hinter dem Hornhautscheitel gelegen sein, mithin, da die Entfernung der Netzhaut von dem Hornhautscheitel im normalen (emmetropischen) Auge etwa = 24 Mm. ist (vgl. I. 1 dieses Handbuches p. 44) 4 bis 8 Mm. hinter der Netzhaut liegen. Wenn nun, wie wir weiter sehen werden, durch die Krystalllinse die Brennweite der Augenmedien vermindert wird, so wird doch, wenn dieselbe mit regelmässigen Kugelflächen versehen ist, eine Vereinigung der Lichtstrahlen, wie sie für das deutliche Sehen erforderlich ist, in einem Punkte nicht erfolgen können, weil die Brennweite des Hornhautsystems im horizontalen Meridiane eine andere ist, als im verticalen Meridiane. Ist in Figur 16 HZ der horizontale Meridian und f_h der Brennpunkt für denselben, $v\tau$ der verticale Meridian und f_v sein Brennpunkt, so wird ein homocentrisches Strahlenbündel sich theils in f_h, theils in f_v vereinigen und für andere Meridiane, welche mehr als der horizontale und weniger als der verticale Meridian gekrümmt sind, der Vereinigungspunkt der Lichtstrahlen zwischen f_h und f_v liegen müssen.

Es giebt dann also keinen gemeinsamen, einfachen Brennpunkt, sondern eine Brennlinie (Brennstrecke, interval focal STURM), welche z. B. für das Auge VI der Tabelle III. 0,890 Mm. betragen würde. Allgemein muss, je grösser die Differenzen in den Krümmungshalbmessern verschiedener Meridiane sind, um so länger die Brennstrecke f_h f_v sein, unabhängig von dem Winkel, welchen der am stärksten und der am schwächsten gekrümmte Meridian mit einander bilden.

Fig. 16.

Auf die Folgen dieser Differenzen für das Sehen werden wir in § 18 zurückkommen. (vgl. DONDERS, Refractionsanomalien Cap. VIII, Astigmatismus.)

§ 7. Entfernung des Linsenscheitels vom Hornhautscheitel. Es ist nun weiter für die Krystalllinse zu bestimmen der Krümmungsradius der vorderen und hinteren Fläche, so wie der Ort des Scheitelpunktes dieser Flächen in Bezug auf den Hornhautscheitel.

Der Ort des Scheitelpunktes der vorderen Linsenfläche in Bezug auf den Hornhautscheitel ist gegeben, wenn wir 1) die Distanz des vorderen Linsenscheitels von dem Hornhautscheitel, 2) die Lage des Linsenscheitels in Bezug auf die Hornhautaxe oder die Gesichtslinie kennen. Die letztere Bestimmung ist gleichbedeutend mit der Entscheidung der Frage, ob das Auge genau centrirt sei.

Die Untersuchungen von HELMHOLTZ (A. f. O. I. 2 p. 36 und Phys. Optik p. 86) und KNAPP (A. f. O. VI. 2 p. 1) haben ergeben, dass die Hornhautaxe nicht durch den Scheitelpunkt der vorderen Linsenfläche geht, sondern etwa 2° medianwärts von dem Scheitel der Linsenfläche verläuft, mitunter aber auch weniger.

Für den horizontalen Meridian des Auges haben die Beobachtungen der genannten Forscher ergeben, dass wenn von dem beobachteten Auge ein Punkt fixirt wurde und das Licht unter einem bestimmten Winkel mit der Gesichtslinie von der Schläfenseite her (lateralwärts) einfiel in der Art, dass die Reflexbilder der vorderen Linsenfläche genau in der Mitte zwischen den Reflexbildern der Hornhaut und der hinteren Linsenfläche erschienen, dies nicht mehr der Fall war, wenn Licht und Beobachter ihre Stellen wechselten, sondern dann der Gesichtslinie eine andere Richtung durch Verstellung des Fixirzeichens gegeben werden musste. HELMHOLTZ und KNAPP erhielten folgende Werthe

	HELMHOLTZ *)			KNAPP			
Licht kommt	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.
medianwärts:	4° 57′	8° 12′	7° 44′	6° 48′	6° 22′	7° 56′	5° 39′
lateralwärts:	3° 47′	5° 6′	5° 43′	4° 50′	3° 40′	4° 36′	6° 4′

*) Nach den Bemerkungen von KNAPP, A. f. O. VI. 2 p. 7 sind die von HELMHOLTZ a. a. O. gegebenen Werthe umzukehren, was in der vorliegenden Tabelle geschehen ist.

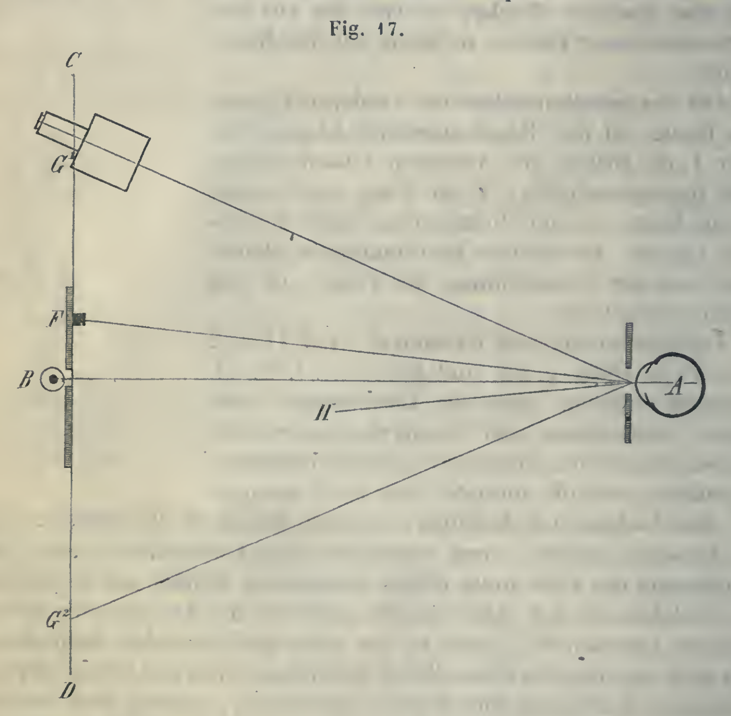
Die Werthe sind immerhin so wenig different, dass man für die meisten Verhältnisse beim Sehen die Differenz unbeachtet lassen und das Auge als centrirt ansehen kann. Wir werden in § 18 indess noch darauf zurückkommen.

Es ist zweitens der Abstand des Linsenscheitels von dem Hornhautscheitel in der Augenaxe zu bestimmen.

Helmholtz (A. f. O. I. 2 p. 31) hat diese Bestimmung in der Weise vorgenommen, dass er zunächst die Entfernung der Pupillarebene von dem Hornhautscheitel zu ermitteln suchte. Unter der Annahme, dass der Pupillarrand der Iris dicht an der Linse anliegt, beobachtete er die scheinbare Lage des Reflexbildchens von der Hornhaut in Bezug auf den Mittelpunkt der Pupillarfläche und berechnete aus den gefundenen Winkelgrössen, so wie aus dem vorher bestimmten Radius der Hornhautkrümmung die Distanz vom Hornhautscheitel und von der Hornhautaxe oder der Gesichtslinie.

Die Beobachtungen werden in der Weise ausgeführt, dass das Reflexbild einer Lichtflamme von der Hornhaut mittelst des Ophthalmometers erst von der

Fig. 17.



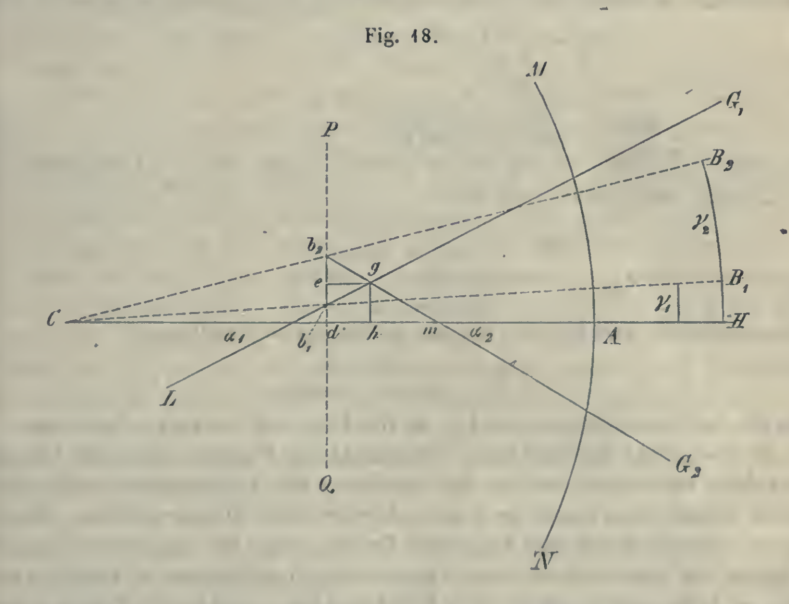
Nasenseite her beobachtet wird, und dabei das beobachtete Auge einen Punkt fixirt, welchem eine solche Lage gegeben wird, dass das Reflexbild genau in der Mitte der Pupille zu liegen scheint. Dann wird das Ophthalmometer auf die Schläfenseite gestellt und ebenso verfahren. Daraus ergeben sich die Winkel, welche die Verbindungslinie des Auges und der Flamme mit der Gesichtslinie (bezw. der Hornhautaxe) bilden, und die Winkel, welche die Beobachtungslinie des Ophthalmometers mit der Gesichtslinie bildet. Da die Reflexbilder scheinbar in einer Entfernung hinter der Hornhaut liegen, welche gleich dem halben Krüm-

ıungsradius derselben ist, so ist nur die Entfernung der Hornhautbildchen von er Iris zu bestimmen.

Im Speciellen ist die Anordnung des Versuches folgende: das beobachtete uge A Figur 17 fixirt den Punkt F, welcher an einer Skala verschiebbar ist; die lamme befindet sich in B; das Ophthalmometer wird das eine Mal in G^1, das ndere Mal in G^2 aufgestellt und seine planparallelen Glasplatten so gedreht, dass ei einer bestimmten Lage von F die Doppelbilder der Lichtflamme auf zwei diaıetral gegenüberliegende Punkte des Pupillarrandes der Iris fallen. Bei dieser tellung des beobachteten Auges steht dann das Hornhautbildchen perspectivisch inter dem Mittelpunkte der Pupille. Substituirt man statt der Gesichtslinie die lornhautaxe, und denkt statt ihrer den Lichtpunkt verschiebbar, so ergiebt sich blgende Construction (nach Knapp) für die Lage des beiden Beobachtungen geıeinschaftlichen Durchschnittspunktes.

Es sei MAN Figur 18 ein horizontaler Durchschnitt der Hornhaut, C ihr Krümmungsmittelpunkt, CH die Hornhautaxe, CA der Hornhautradius $= R$ und PQ die Brennebene des Convexspiegels der Hornhautoberfläche, welche durch

Fig. 18.



lie Mitte des Hornhautradius, durch d gelegt sei, so dass $dC = dA = \frac{1}{2} R$. Für lie erste Beobachtung sei $B_1 C$ die Verbindungslinie der Flamme B_1, welche die Brennebene PQ in b_1 schneidet und mit der Hornhautaxe den Winkel γ_1 bildet; erner sei $G_1 b_1$ die Verbindungslinie des Ophthalmometers G_1 mit dem Orte des irtuellen Bildes b_1, welches die Flamme B_1 entwirft, und der Winkel, welchen lie Fortsetzung der Linie $G_1 b_1$ nach L hin mit der Hornhautaxe bildet $= \alpha_1$. — Für die zweite Beobachtung seien entsprechend die Zeichen mit dem Exponenen 2, also $B_2 b_2$, $G_2 b_2$, α_2, $\gamma_2 \ldots$ Sowohl die Richtungslinie $G_1 b_1$, wie die Richungslinie $G_2 b_2$ geht durch den Mittelpunkt der Pupille; da derselbe beiden Richungslinien gemeinschaftlich ist, so muss er ihr Durchschnittspunkt sein, mithin n g liegen. Die Lage von g ist also zu berechnen sowohl in Bezug auf seinen

Abstand von der Hornhautaxe $hg = y$, als in Bezug auf seinen Abstand von den Hornhautscheitel $hA = x$. — Setzen wir zur Abkürzung $b_1 d = \beta_1$ und $b_2 d = \beta_2$ so sind, da wir $dA = \frac{1}{2} R$ angenommen haben

$$\beta_1 = \tfrac{1}{2} R \text{ tang } \gamma_1 \text{ und } \beta_2 = \tfrac{1}{2} R \cdot \text{tang } \gamma_2 .$$

Ziehen wir die Hülfslinie ge parallel der Hornhautaxe CA, so ist $b_2 e = b_2 g \cdot \sin \alpha$ und da $b_2 e = \beta_2 - y$, so ist

$$\beta_2 - y = b_2 g \cdot \sin \alpha_2 ;$$

ferner ist $\sphericalangle\, b_2 b_1 g = 90^\circ - \alpha_1$ und $b_2 g b_1 = \alpha_1 + \alpha_2$, daher verhält sich

$$b_2 g : (\beta_2 - \beta_1) = \sin (90^\circ - \alpha_1) : \sin (\alpha_1 + \alpha_2), \text{ woraus}$$

$$b_2 g = \frac{\cos \alpha_1 (\beta_2 - \beta_1)}{\sin (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Daraus ergiebt sich

$$\beta_2 - y = \frac{\cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2} (\beta_2 - \beta_1) \text{ und}$$

$$y = \beta_2 - \frac{\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 (\beta_2 - \beta_1)}{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2}$$

Durch Division von Zähler und Nenner mit $\cos \alpha_1 \sin \alpha_2$ erhält man

$$y = \beta_2 - \frac{(\beta_2 - \beta_1)}{\frac{\text{tang } \alpha_1}{\text{tang } \alpha_2} + 1}$$

oder

$$y = \frac{\beta_2 \text{ tang } \alpha_1 + \beta_1 \text{ tang } \alpha_2}{\text{tang } \alpha_1 + \text{tang } \alpha_2} \quad \ldots\ldots \quad \text{VIII}$$

Ferner findet man den Werth für $x = hA = \frac{1}{2} R - dh$; dh ist aber $= e$ $= b_2 g \cdot \cos \alpha_2$; oben hatten wir aber

$$b_2 g = \frac{\cos \alpha_1 (\beta_2 - \beta_1)}{\sin (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

woraus

$$dh = \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 (\beta_2 - \beta_1)}{\sin (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Dividirt man Zähler und Nenner mit $\cos \alpha_1 \cos \alpha_2$, so erhält man

$$x = \tfrac{1}{2} R - \frac{(\beta_2 - \beta_1)}{\text{tang } \alpha_1 + \text{tang } \alpha_2} \quad \ldots\ldots \quad \text{IX}$$

Durch die Coordinaten y und x ist die Lage des Punktes g bestimmt. Der Punkt g ist aber nicht der wirkliche Mittelpunkt der Pupille, denn die Iris selbst erscheint dem Beobachter wegen der Brechung der Lichtstrahlen in dem Hornhautsystem etwas vergrössert und nach der Hornhaut hin verschoben. Das Bild der Iris in seiner scheinbaren Lage und Grösse nennt Helmholtz die scheinbare Iris. Da wir die vordere und hintere Brennweite der Hornhaut $F_{,}$ und $F_{,,}$ kennen (cf. § 6), so können wir daraus den Mittelpunkt der wirklichen Pupille oder die wirklichen Ordinaten ξ und η berechnen. Aus Formel 5) in § 2 für die conjugirten Brennpunkte erhalten wir

$$\frac{F_{,}}{x} + \frac{F_{,,}}{\xi} = 1$$

und

$$\xi = \frac{x F_{,,}}{x - F_{,}}$$

und da ξ als virtueller Vereinigungspunkt negativ zu setzen ist

$$\xi = \frac{x F_{,,}}{x + F_{,}} \quad \ldots\ldots \quad \text{X}$$

In gleicher Weise haben wir, wenn y die Grösse des Bildes im ersten, η im zweiten Medium ist

$$\frac{\eta}{y} = \frac{F_{,}}{F_{,} - x} = \frac{F_{,,} - \xi}{F_{,,}}, \text{ woraus, wegen } x \text{ negativ}$$

$$\eta = \frac{y\,F_{,}}{x + F_{,}} = y\,\frac{(F_{,,} - \xi)}{F_{,,}} \quad \ldots\ldots \quad \text{XI)}$$

Dadurch werden die wirklichen Entfernungen des Hornhautscheitels von dem Mittelpunkte der Pupille $= \xi$ und die wirkliche Entfernung des Mittelpunktes der Pupille von der Hornhautaxe $= \eta$ bestimmt.

Bevor wir die nach dieser ophthalmometrischen Methode erhaltenen Werthe anführen, müssen wir noch zwei andere Methoden zur Bestimmung der Tiefe der vorderen Kammer angeben.

Die eine Methode von DONDERS, auf dem Londoner ophthalmologischen Congress 1872 mitgetheilt (ZEHENDER, Monatsblätter für Augenheilkunde 1872 p. 300), besteht darin, dass man ein Cornealmikroskop zuerst auf die mit einigen Körnchen Calomel bestreute Hornhautoberfläche einstellt, dann auf den Pupillarrand der Iris: die Differenz der beiden Einstellungen wird genau gemessen und ergiebt direct die scheinbare Tiefe der Kammer, also x, woraus dann ξ nach den obigen Formeln berechnet werden kann. (Vergl. III. 1. p. 167 dieses Handbuchs.)

Die andere Methode von MANDELSTAMM und SCHÖLER (A. f. O. XVIII. 1. p. 155) und später von REICH (A. f. O. XX. 1. p. 207) angewendet, gleichfalls von HELMHOLTZ ersonnen, beruht auf folgendem Princip: es wird durch eine planparallele Glasplatte das Bild einer entfernten Flamme mittelst einer Sammellinse so in das beobachtete Auge geworfen, dass dem durch das Cornealmikroskop (Mikrooptometer, REICH) sehenden Beobachter das von der Hornhaut reflectirte Flammenbild und Pupillarrand sehr klar und scharf erscheinen: darauf wird, nachdem das beobachtete Auge entfernt ist, bestimmt, in welcher Entfernung vom Objective des Mikroskops ein Object sich befinden muss, um scharf gesehen zu werden: es ergiebt sich daraus der Ort, an welchem das Reflexbild der Cornea sich befunden haben muss. MANDELSTAMM, SCHÖLER und REICH geben dieser mikrooptometrischen Methode den Vorzug vor der ophthalmometrischen in Bezug auf die Bestimmung der Kammertiefe. Das Genauere über das Instrument und die Berechnung s. a. a. O.

Für den wahren Abstand der Pupillarebene vom Hornhautscheitel haben sich nun folgende Werthe ξ ergeben (in Mm.)

HELMHOLTZ: II = 4,024, III = 3,597, IV = 3,739,
KNAPP: V = 3,692, VI = 3,707, VII = 3,477, VIII = 3,579,
ADAMÜCK-WOINOW: X = 3,998, XI = 3,237, XII = 2,900, XIII = 3,633,
MANDELSTAMM und SCHÖLER XIV = 3,921, XV = 3,651 (mit Mikrooptometer).

REICH fand	ophthalmometrisch:	mikrooptometrisch:
	XVI = 3,669	3,639
	XVII = 3,636	3,708.

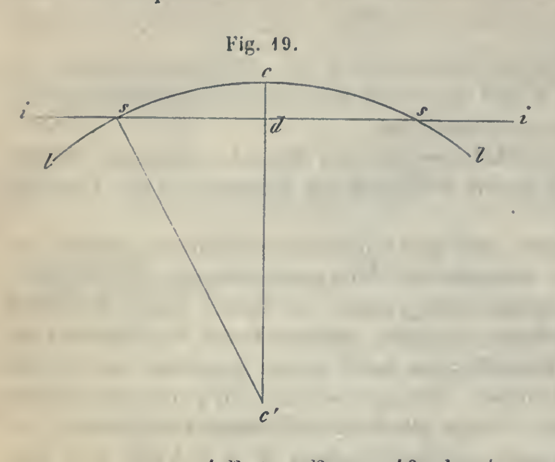
Für den Abstand des Mittelpunktes der Pupille von der Hornhautaxe $= \eta$ sind die gefundenen Werthe sehr verschieden und schwanken von 0,032 bis 0,398 Mm., im Mittel von 11 Bestimmungen (HELMHOLTZ, KNAPP, ADAMÜCK und WOINOW) ergiebt sich $\eta = 0{,}229$ Mm.

Ich bemerke, dass die angegebenen Zahlen sich nur auf das in Ruhe befindliche, d. h. nicht, oder für die Ferne accommodirte Auge beziehen.

Da es nun hier darauf ankommt, die Entfernung des vorderen Scheitels der Krystalllinse von dem Hornhautscheitel zu bestimmen, so wird von dem Werthe ξ

noch in Abzug zu bringen sein die Grösse, um welche der Scheitel der Krystalllinse die Pupillarebene in die Kammer hinein überragt. Diese Grösse ist sehr gering, lässt sich aber aus der Linsenkrümmung (s. § 8) und dem Durchmesser der Pupille berechnen unter der Annahme, dass der Pupillarrand der Linse dicht anliegt. Ist in Figur 19 *ii* die Iris, *ll* die Krümmung der Linse, *ss* die Pupille, $sc' = cc'$ der Radius der Linsenkrümmung $= r$, so wird $cd = z$ das Stück sein, um welches die Linse den Pupillarrand überragt. Wir haben dann, wenn wir sd, die halbe Pupillenweite mit p bezeichnen

Fig. 19.



$$c'd^2 + sd^2 = sc'^2 \text{ oder } (r - z)^2 + p^2 = r^2$$

woraus $r - z = \sqrt{(r^2 - p^2)}$

und $z = r - \sqrt{(r^2 - p^2)}$ . . . . . XII)

Da die Pupillenweite sehr variirt (cf. § 16), so ist die Bestimmung von z mit dieser veränderlich. Die scheinbare Grösse der Pupille findet man direct mittelst des Ophthalmometers, die wirkliche Grösse ergiebt sich auch hier nach Formel 5), indem, wenn wir mit p die scheinbare, mit π die wirkliche Grösse derselben bezeichnen, mit x die scheinbare Entfernung der Pupillarebene von dem Hornhautscheitel und mit $F_{,}$ und $F_{,,}$ die Brennweiten der Hornhaut

$$\pi = \frac{p \cdot F_{,}}{x + F_{,}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{XIII)}$$

π variirt von 2,4 Mm. bis 5,8 Mm.

Da der Werth von z etwa $= 0{,}15$ bis $0{,}266$ Mm. (Helmholtz) beträgt, so kann man im Mittel 0,2 Mm. dafür setzen und ihn meistens vernachlässigen.

Mit Berücksichtigung von $z = 0{,}2$ Mm. würde sich dann im Mittel aus obigen 15 Beobachtungen von ξ für den Abstand des Linsenscheitels von dem Hornhautscheitel ergeben 3,430 Mm.

§ 8. Krümmung der vorderen Linsenfläche. Die Krümmungsflächen der Krystalllinse sind vor Helmholtz nur an den herausgenommenen Linsen todter Augen gemessen worden. Messungen an Krystalllinsen, welche aus dem Auge herausgenommen sind, können, wie Knapp bemerkt, keinen Anspruch auf grosse Genauigkeit machen, auch wenn die Herausnahme möglichst vorsichtig geschieht, da ja die Linse von allen ihren Verbindungen gelöst werden muss. Indess haben doch sowohl Helmholtz als Knapp an je zwei herausgenommenen Linsen Messungen der Krümmungsflächen nach der in § 3 besprochenen Methode von Helmholtz gemacht (s. Helmholtz, Physiol. Optik p. 80.) Helmholtz hat an der einen Linse den Radius der vorderen Krümmungsfläche = 10,462 Mm., an der zweiten = 8,865 gefunden (cf. A. f. O. I. 2. p. 49); Knapp (A. f. O. VI. 2. p. 5) für die Linse *A* den Krümmungsradius im Scheitel der Vorderfläche

= 9,315 Mm., in der Mitte zwischen Rand und Scheitel = 8,979 und 8,968 Mm. auf der andern Seite. Für die Linse *B* entsprechend 8,218 Mm., 9,541 Mm. und 9,550 Mm.: bei *A* war also der Scheitel weniger gekrümmt, als die seitliche Zone, bei *B* umgekehrt. — Da für die Linse noch mehr wie für die Hornhaut die Randstrahlen abgeblendet werden, so ist die Annahme erlaubt, dass der in Betracht kommende Theil der vorderen Linsenfläche sphärisch gekrümmt ist. Dasselbe gilt für die hintere Linsenfläche, für welche Helmholtz den Krümmungsradius = 5,860 und 5,889, Knapp im Scheitel 5,509 (*A*) und 5,173 (*B*), — zwischen Rand und Scheitel auf der einen Seite 5,903 (*A*) und 5,160 (*B*) auf der andern Seite 5,261 bezw. 5,236 Mm. fand. — Ich will gleich bemerken, dass die angegebenen Zahlen wenig differiren von den an lebenden Augen gemachten Bestimmungen.

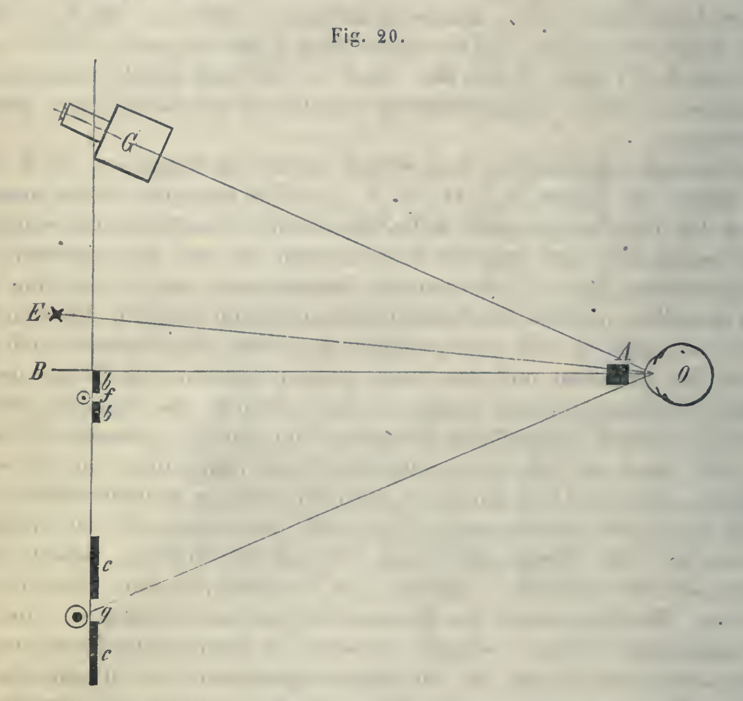
Die Messung am lebenden Auge wurde zuerst von Helmholtz (A. f. O. I. 2. p. 49), später von Knapp (A. f. O. VI. 2. p. 25) in folgender Weise ausgeführt: Da wegen der nicht bedeutenden Differenz zwischen dem Brechungsvermögen des Kammerwassers und der äusseren Linsenschicht die von der vorderen Linsenfläche entworfenen Spiegelbilder ziemlich lichtschwach sind, so ist eine genaue Messung derselben mittelst des Ophthalmometers kaum möglich. Helmholtz verfuhr daher so, dass er von einer grösseren und von einer kleineren hellen Linie Bilder auf der Hornhaut und der Linse spiegeln liess und die Grösse des Hornhautbildes, welches gemessen wurde, so lange variirte, bis es gleich gross, wie das von der vorderen Linsenfläche reflectirte Bild von der grösseren Flamme erschien. Wir haben uns nämlich vorzustellen für die Spiegelung von der vorderen Linsenfläche, dass das Licht durch die Hornhaut und das Kammerwasser vor der Linse wie durch eine convexconcave Linse geht, deren concave Seite mit Spiegelfolie belegt ist. Die Brennweite dieses Spiegels ist abhängig sowohl von der Krümmung des brechenden Systems, als von der Krümmung der spiegelnden Fläche. Die Brennweite des brechenden Systems ist bekannt. Die Brennweiten spiegelnder Flächen verhalten sich aber für ferne Gegenstände umgekehrt wie die Grösse der Objecte, da für ferne Gegenstände die Brennweite gleich dem halben Radius gesetzt werden kann. Ist der Krümmungsradius der Hornhaut bekannt, so lässt sich aus ihm und aus den Brennweiten der beiden spiegelnden Flächen der Krümmungsradius der vorderen Linsenoberfläche berechnen.

Das Nähere über die Anstellung der Beobachtungen ist Folgendes: das beobachtete Auge befindet sich dicht an dem hinteren Rande eines kleinen wagerechten Planspiegels *A* Figur 20 und fixirt einen entfernten Punkt *E*. In 330 Mm. Abstand von dem Auge und in messbarer Höhe über der Ebene des Planspiegels ist eine grosse Gasflamme *g* angebracht und in gleichem Abstande vom Auge und in messbarer aber veränderbarer Höhe befindet sich eine zweite, kleinere Flamme *f*. Der Planspiegel bewirkt, dass Spiegelbilder von der grossen und kleinen Flamme entstehen und also Doppelreflexbilder vom beobachteten Auge *O* zurückgeworfen werden; die Grösse der Objecte ist also gegeben durch die doppelte Entfernung der Gasflamme von der Ebene, in welcher der Planspiegel liegt. Die grosse Flamme *g* dient zur Erzeugung zweier Reflexbildchen von der vorderen Linsenfläche, die kleine Flamme zur Erzeugung zweier Reflexbildchen von der Hornhaut: man stellt nun, während das beobachtete Auge den Punkt *E* fixirt, die kleine Flamme, indem man sie auf- oder abwärts schiebt, so ein, dass ihr

von der Hornhaut entworfenes Doppelbild genau gleich gross erscheint (dem in G befindlichen freien oder mit einem schwach vergrössernden Fernrohr versehenen Auge des Beobachters), wie das von der vorderen Linsenfläche herrührende Doppelbild der grossen Flamme.

Man erhält also gleich grosse Spiegelbilder von ungleich grossen, aber vom Auge gleich weit entfernten Objecten. Die Brennweiten der spiegelnden Systeme verhalten sich umgekehrt wie die Grösse der Objecte. Nennen wir das von der

Fig. 20.



Hornhaut gespiegelte Bild B_1, das von der vorderen Linsenfläche gespiegelte B_2, setzen die Grösse der beiden gleichen Bilder $= \beta$, die Distanz der Objecte von den spiegelnden Flächen $= d$, bezeichnen ferner den Krümmungsradius der Hornhaut mit R_1, den der Linsenkrümmung mit R_2, so ist

$$B_1 : \beta = (R_1 + d) : \tfrac{1}{2} R_1$$

und

$$B_2 : \beta = (R_2 + d) : \tfrac{1}{2} R_2$$

Beide Gleichungen durch einander dividirt geben

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{\frac{1}{2} R_2 (R_1 + d)}{\frac{1}{2} R_1 (R_2 + d)}$$

Da die Differenz zwischen R_1 und R_2 im Verhältniss zu d sehr klein ist, so ergiebt sich, wenn wir dieselbe vernachlässigen

$$\frac{B_1}{B_2} = \frac{\frac{1}{2} R_2}{\frac{1}{2} R_1}$$

Ist die Brennweite der Hornhaut bekannt $(= \frac{1}{2} R_1)$, die der vorderen Linsenfläche $= q$, so finden wir

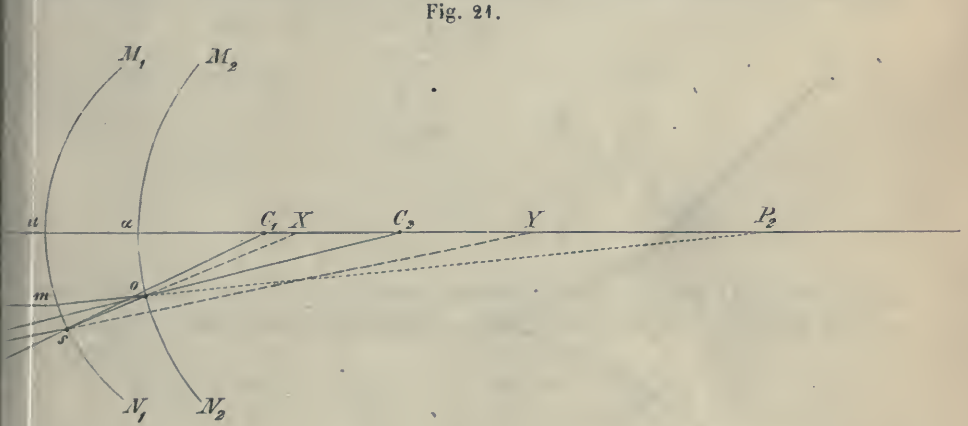
$$q = \frac{\frac{1}{2} R_1 \; B_1}{B_2} \quad \ldots\ldots \quad \text{XIV)}$$

Nach dieser Formel erhält KNAPP für seine vier normalsichtigen Augen folgende Brennweiten (Gauss'sche Hauptbrennweiten) der vorderen Linsenfläche:
V = 5,517, VI = 5,300, VII = 5,617, VIII = 6,955, im Mittel 5,847 Mm.

Es ist dazu zu bemerken, dass jede der Zahlen ein Mittelwerth aus mindestens 4 Beobachtungen ist und dass, worauf wir sogleich noch zurückkommen werden, die Bestimmung sich weniger genau machen lässt, als für die Hornhaut. (KNAPP, l. c. p. 47.) Damit ist nun die Entfernung des Brennpunktes vom zweiten Hauptpunkte des dioptrisch-katoptrischen Systems bestimmt. Um den Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche daraus zu berechnen, müssen wir 1) den Ort des Brennpunktes mit Bezug auf einen anderen bekannten Punkt, den Scheitelpunkt der Hornhaut, 2) den Ort des zweiten Hauptpunktes bestimmen.

Denken wir uns in Figur 21 eine Axe P_1 P_2 durch den Scheitelpunkt der Hornhaut a und den der vorderen Linsenfläche α gelegt, und nennen die Distanz

Fig. 21.



der beiden Scheitelpunkte d, den Krümmungsmittelpunkt der Hornhaut C_1, den der vorderen Linsenfläche C_2, ferner die vordere Brennweite des Hornhautsystems $F_{,}$, die hintere $F_{,,}$. Ein mit der Axe paralleler Lichtstrahl Lm wird nun zuerst durch das Hornhautsystem abgelenkt, dann von der Linsenfläche zurückgeworfen in o unter demselben Winkel, unter welchem er aufgefallen ist. Denken wir uns den zurückgeworfenen Strahl os rückwärts verlängert, so ist der Punkt X, in welchem er die Axe des Systems schneidet, der virtuelle Vereinigungspunkt, dessen Entfernung von dem Hornhautscheitel $aX = x$ sei; nennen wir endlich r den Radius der convexen spiegelnden Linsenfläche, welcher gefunden werden soll, so ist

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{d - F_{,,}} = \frac{2}{r}$$

woraus

$$\frac{1}{x} = \frac{2}{r} - \frac{1}{d - F_{,,}} = \frac{2\,(d - F_{,,}) - r}{r\,(d - F_{,,})}$$

und

$$x = \frac{r \cdot (d - F_{,,})}{2\,(d - F_{,,})\,r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad \text{XV)}$$

Da die Strahlen bei ihrem Austritte aus der Hornhaut noch einmal gebrochen werden, so wird ihr virtueller Vereinigungspunkt Y weiter als X von dem

Scheitelpunkte der Hornhaut entfernt liegen nach Massgabe der Brennweite der Hornhaut, also sein Ort gegeben sein durch die Brennweiten des Hornhautsystems, die Bildweite des Linsenspiegels und die Entfernung des Hornhautscheitels vom dem Linsenscheitel d. Setzen wir $\alpha Y = y$, so ist nach 5) (§ 2)

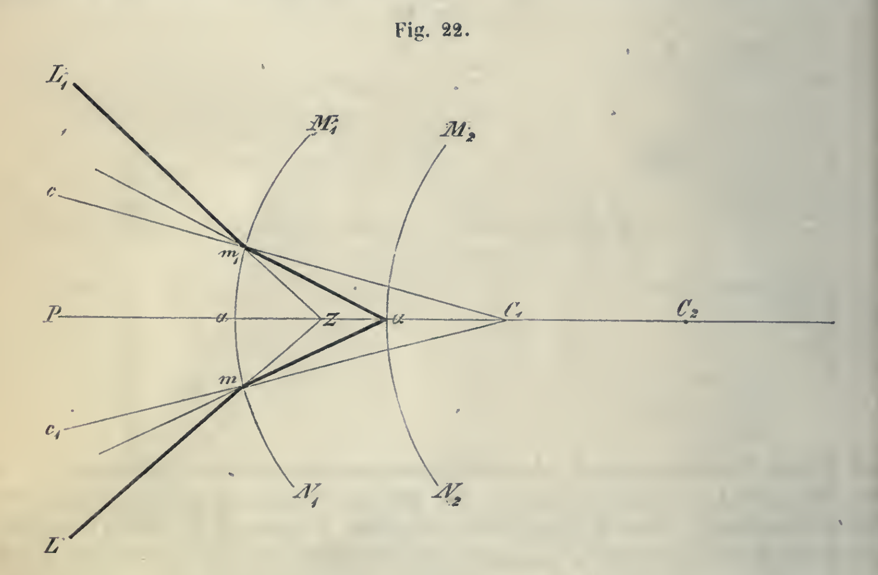
$$\frac{F_{,}}{y} + \frac{F_{,,}}{d-x} = 1$$

woraus
$$\frac{F_{,}}{y} = 1 - \frac{F_{,,}}{d-x} = \frac{d-x-F_{,,}}{d-x}$$

und
$$y = \frac{F_{,}(d-x)}{d-x-F_{,,}} \quad \ldots\ldots \qquad \text{XVI}$$

Zweitens ist nun noch erforderlich die Bestimmung des zweiten Hauptpunktes. Von den beiden Hauptpunkten ist jeder das Bild des anderen (§ 2). Ist zwischen der Hornhautkrümmung und der Linsenkrümmung ein gleichmässiges Medium, so fallen die beiden Hauptpunkte in einen zusammen, weil ein Strahl,

Fig. 22.



welcher im ersten Mittel durch den ersten Hauptpunkt geht, im letzten durch den zweiten gehen muss. Dieses ist der Punkt α Figur 22. Ein Strahl Lm, der im ersten Medium durch den ersten Hauptpunkt Z geht, trifft im mittleren den Punkt α, wird von demselben zurückgeworfen und nach seiner letzten Brechung geht seine Rückwärtsverlängerung wieder durch Z. Die beiden Hauptpunkte des combinirten Systems fallen hier zusammen; nennen wir die Entfernung dieses Punktes vom Hornhautscheitel aZ (d. h. die Entfernung des zweiten Hauptpunktes von dem ersten Hauptpunkte des brechenden Systems) z, so ist

$$\frac{F_{,}}{z} = \frac{F_{,,}}{d} = 1$$

woraus
$$z = \frac{d\,F_{,}}{d-F_{,,}}.$$

Die oben durch die Beobachtung gefundene Brennweite der vorderen Linsenfläche q ist nun in Bezug auf den Hornhautscheitel bestimmt durch die Gleichungen

ür y und für z, indem y die Entfernung des Brennpunktes des combinirten lioptrisch-katoptrischen Systems vom Hornhautscheitel, z die Entfernung des lauptpunktes vom Hornhautscheitel angiebt. Es ist also

$$q = y - z$$

ınd wenn wir die Werthe für y und z einsetzen

$$\begin{aligned} q &= \frac{F_{,}\,(d - x)}{d - x - F_{,,}} - \frac{d \cdot F_{,}}{d - F_{,,}} \\ &= \frac{(F_{,}\,d - F_{,}\,x)\,(d - F_{,,}) - d\,F_{,}\,(d - x - F_{,,})}{(d - x - F_{,,})\,(d - F_{,,})} \\ &= \frac{F_{,}\,d\,(d - F_{,,}) - F_{,}\,x\,(d - F_{,,}) - d\,F_{,}\,(d - F_{,,}) + d\,F_{,}\,x}{(d - x - F_{,,})\,(d - F_{,,})} \\ &= \frac{d\,F_{,}\,x - F_{,}\,x\,d - F_{,}\,x\,F_{,,}}{(d - x - F_{,,})\,(d - F_{,,})} = \frac{F_{,}\,F_{,,}}{\frac{(d - F_{,,})\,(d - x - F_{,,})}{x}} \\ &= \frac{F_{,}\,F_{,,}}{(d - F_{,,})\left(\frac{(d - F_{,,})}{x} - 1\right)} \quad \ldots\ldots \quad \text{XVII} \end{aligned}$$

ietzen wir den Werth für $x = \frac{r\,(d - F_{,,})}{2\,(d - F_{,,}) - r}$ ein, so wird

$$\begin{aligned} q &= \frac{F_{,}\,F_{,,}}{(d - F_{,,})\left[\frac{(d - F_{,,})\,\left(2\,(d - F_{,,}) - r\right)}{r\,(d - F_{,,})} - 1\right]} \\ &= \frac{F_{,}\,F_{,,}}{(d - F_{,,})\left(\frac{2\,(d - F_{,,}) - r}{r} - 1\right)} = \frac{r \cdot F_{,}\,F_{,,}}{2\,(d - F_{,,})\,(d - F_{,,} - r)} \end{aligned}$$

lieraus lässt sich nun r, der Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche, beechnen, da q durch Beobachtung gefunden, d, $F_{,}$ und $F_{,,}$ gleichfalls bekannt ind, nämlich

$$\begin{aligned} 2q\,(d - F_{,,})^2 &= r\,F_{,}\,F_{,,} + r \cdot 2q\,(d - F_{,,}) \\ q\,(d - F_{,,})^2 &= r\left(\tfrac{1}{2}\,F_{,}\,F_{,,} + q\,(d - F_{,,})\right) \\ \frac{q\,(d - F_{,,})^2}{\frac{1}{2}\,F_{,}\,F_{,,} + q\,(d - F_{,,})} &= r \end{aligned}$$

der wie Helmholtz schreibt $\left(\text{da } (d - F_{,,})^2 = (F_{,,} - d)^2 \text{ ist}\right)$

$$r = \frac{q\,(F_{,,} - d)^2}{\frac{1}{2}\,F_{,}\,F_{,,} - q\,(F_{,,} - d)}$$

ınd da q als virtuelles Bild negativ zu nehmen ist

$$r = -\frac{q\,(F_{,,} - d)^2}{\frac{1}{2}\,F_{,}\,F_{,,} + q\,(F_{,,} - d)} \quad \ldots\ldots \quad \text{XVIII}$$

Nach dieser Formel haben Helmholtz und Knapp folgende Werthe für len Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche bei Ruhe, bezw. accommodation für die Ferne erhalten:

Helmholtz II = 11,9 Mm., III = 8,8 Mm., IV = 10,4 Mm.,
Knapp V = 8,3 - VI = 7,9 - VII = 7,9 - VIII = 9,1
m Mittel = 9,1 Mm.

Die Differenzen der dieser Berechnung zu Grunde liegenden Einzelbestimnungen sind wegen der Lichtschwäche der Reflexbilder und wegen der Grösse ler Flammen, die zu ihrer Erzeugung dienen, ziemlich gross und betragen bis 1 % für r; wir haben deswegen nur die erste Decimale angegeben.

Wegen der Lichtschwäche und Undeutlichkeit der Reflexbilder kam Helm-

holtz auf den Gedanken, Sonnenlicht statt der Gasflammen zu benutzen, wa von Rosow (A. f. O. XI. 2. p. 129), Strawbridge (Zehender's Monatsblätter VII p. 480), Adamück und Woinow (A. f. O. XVI. 1. p. 150. — Woinow, Ophthal mometrie p. 100), Mandelstamm und Schöler (A. f. O. XVIII. 1. p. 172) un Reich (A. f. O. XX. 1. p. 218) ausgeführt wurde. Folgendes sind die erhaltene Werthe für r:

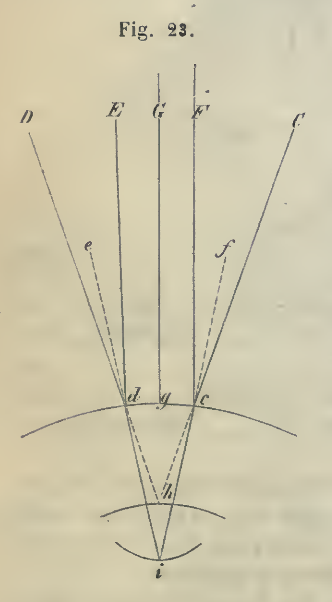
Rosow:	9,824,
Strawbridge	9,851—10,761,
Adamück und Woinow:	9,777—10,202 — 9,114—10,543 (Presbyopen)
Mandelstamm und Schöler:	9,541—10,159,
Reich:	10,408—10,565 — 11,197 (Myopen).

Als Mittel aus diesen letzten zwölf Beobachtungen würde sich ergebe $r = 10,25$ Mm., was mit dem Mittel aus den Messungen von Helmholtz $r = 10,4$ seh wohl stimmt, von dem Mittel aus Knapp's Bestimmungen $r = 8,3$ sehr abweicht

Als abgerundete Mittelzahl dürfen wir wohl für den Krümmungsradiu der vorderen Linsenfläche 10 Mm. annehmen.

§ 9. Ort des hinteren Linsenscheitels. Der Ort des hinteren Linsen scheitels muss in anderer Weise bestimmt werden, als der Ort des vordere Linsenscheitels, da die hintere Linsenfläche mit keinem sichtbaren Theile in Be rührung ist, wie es die Iris für die Vorderfläche der Linse ist. Die Bestimmun besteht im Princip darin, dass der Beobachter von zwei verschiedenen Richtunge nach einander den Lichtreflex, welcher genau von demselben Punkte der hintere Linsenfläche geworfen wird, in Bezug auf einen Hornhautreflex von bekannte Lage bestimmt. Man verfährt dabei so, dass man den Reflex des Lichtes an de hinteren Linsenfläche aufsucht und dann in einer zweiten Beobachtung das Lich genau an die Stelle des Auges, das Auge gena an die Stelle des Lichtes bringt. Das Licht geh dann in der zweiten Beobachtung genau auf dem selben Wege zurück, auf dem es bei der ersten Be obachtung gekommen war, muss also genau a derselben Stelle gespiegelt werden. Bringt ma bei beiden Beobachtungen den Linsenreflex mi einem Hornhautbildchen zur Deckung, so finde sich der scheinbare Ort des reflectirenden Punkte der hinteren Linsenfläche in dem Durchschnitts punkte der beiden, durch die betreffenden Horn hautbildchen gehenden Gesichtslinien. — Wen wir den Ort des vorderen und den Ort des hin teren Linsenscheitels bestimmt haben, so habe wir zugleich die Dicke der Krystalllinse bestimmt.

Fig. 23.

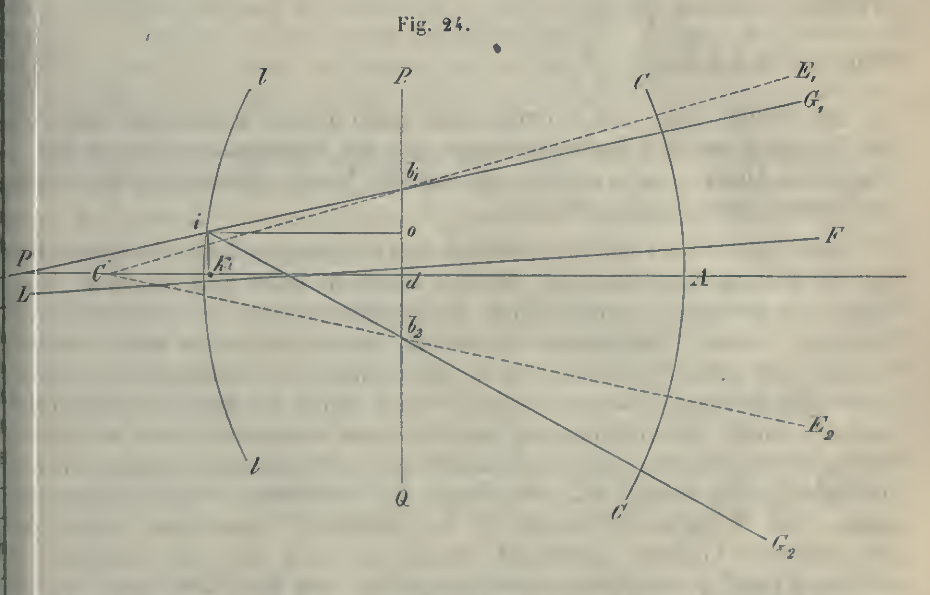


Die Beobachtung wird in folgender Weis (Helmholtz) ausgeführt: von dem beobachtete Auge wird der Punkt F fixirt Figur 23: bei de ersten Beobachtung befindet sich die grosse Licht flamme in C, so dass das Licht in i von der hin teren Linsenfläche reflectirt wird nach D, den

rch ein Stubenfernrohr blickenden Auge des Beobachters; eine kleine blaue
imme G wird so lange an einer gegen die Gesichtslinie verticalen Skala ver-
ioben, bis ihr Hornhautbild g mit dem Reflexbilde i zusammenzufallen scheint;
i der zweiten Beobachtung befindet sich das Auge des Beobachters in C, die
osse Lichtflamme in D: das Licht geht dann auf gleichem Wege, nur in umge-
hrter Richtung; die kleine blaue Flamme werde, damit ihr Hornhautreflexbild
nit dem Reflexbilde der hinteren Linsenfläche zusammenfalle, in E aufgestellt.
nd die Orte des beobachtenden Auges, des beobachteten Auges und der grossen
htflamme durch Messung bestimmt, so erhält man die Winkel, welche die Rich-
igslinie Cc und Dd mit der Gesichtslinie bilden. Sind ebenso die Orte der
inen blauen Flamme durch Messung bestimmt, so findet man daraus die
inkel, welche die Einfallslothe ed und fc auf der Hornhaut mit der Gesichts-
ie bilden, und daraus, da die Krümmung der Hornhaut bekannt ist, die Länge
s Hornhautbogens dg und gc oder die Lage der Punkte d und c auf der Horn-
ut. Aus der Lage dieser Punkte und aus der Richtung der Linien Cc und Dd
det sich der scheinbare Ort des spiegelnden Punktes der hinteren Linsenfläche.

Die Berechnung kann in folgender Weise ausgeführt werden: es sei CC
gur 24 die Hornhautkrümmung, PA die Hornhautaxe, FL die Gesichtslinie, ll
: Krümmung der hinteren Linsenfläche, PQ die Brennebene des Hornhaut-

Fig. 24.



egels, welche den Punkt d so schneidet, dass $Cd = dA = \frac{1}{2}R$; die Richtungs-
ie des Fernrohrs und der Flammen G_1 und G_2 schneiden die Brennebene in
n Punkten b_1 und b_2, welche zugleich die Durchschnittspunkte für die Rich-
igslinie der Hornhautbildchen $E_1 C$ und $E_2 C$ sind. Wir haben nun den Punkt i
bestimmen, sowohl in Bezug auf die Hornhautaxe, als auf den Scheitelpunkt
· Hornhautkrümmung A. Bezeichnen wir die Linie $b_1 d$ mit $\beta_,$, die Linie $b_2 d$
t $\beta_{,,}$ und die Winkel $b_1 Cd$ und $b_2 Cd$, welche die Richtungslinie der kleinen
mme mit der Hornhautaxe bildet, mit p_1 und p_2, so ist

$$\beta_{,} = \tfrac{1}{2} R \text{ tang } p_1$$
$$\beta_{,,} = \tfrac{1}{2} R \text{ tang } p_2$$

Bezeichnen wir wieder ik mit y, so ist

$$y = \beta_{,} - b_1 o$$

$b_1 o$ aber ist $= b_1 i \cdot \sin b_1 i o$

Den $< b_1 i o$ können wir aber, da G_1 mit der Hornhautaxe denselben Wink bildet wie $G_2 = < b_2 i o$ setzen und bezeichnen ihn mit α, dann ist

$$y = \beta_{,} - b_1 i \cdot \sin \alpha$$

$b_1 i$ ist aber $= \dfrac{b_1 b_2 \cdot \cos \alpha}{\sin 2\alpha} = \dfrac{(\beta_{,} + \beta_{,,}) \cos \alpha}{\sin 2\alpha}$

daher
$$y = \beta_{,} - \frac{(\beta_{,} + \beta_{,,}) \sin \alpha \cos \alpha}{\sin \alpha \cos \alpha + \cos \alpha \sin \alpha}$$
$$= \beta_{,} - \frac{(\beta_{,} + \beta_{,,})}{2} \quad \ldots\ldots \quad \text{XI}$$

Es sei ferner die Linie $kA = x$, so haben wir

$$x = \tfrac{1}{2} R + kd$$

kd ist aber $= io = b_{,}i \cdot \cos \alpha$, und da $b_{,}i = \dfrac{(\beta_{,} + \beta_{,,}) \cos \alpha}{\sin 2\alpha}$ war,

so wird $kd = \dfrac{\beta_{,} + \beta_{,,}}{2 \text{ tang } \alpha}$,

mithin $x = \tfrac{1}{2} R + \dfrac{(\beta_{,} + \beta_{,,})}{2 \text{ tang } \alpha} \quad \ldots\ldots \quad \text{X}$

Die Winkel $p_1 p_2$ und α finden sich durch directe Messung der Entfernu der Flammen und des Beobachterauges von der Gesichtslinie und von dem b obachteten Auge. — Ist y positiv, so liegt der hintere Scheitel der Krystalllin medianwärts von der Hornhautaxe.

Es ist damit die scheinbare Lage von i in Bezug auf den Hornhautschei und die Hornhautaxe bestimmt. Um die wirkliche Lage zu bestimmen, müss erstens die Brechung, welche durch das Hornhautsystem hervorgebracht wir bestimmt werden, was ebenso wie für die vordere Fläche der Krystalllinse b rechnet wird mittelst der Formel 5) für die conjugirten Brennpunkte. — Zweite müsste die Brechung bestimmt werden, welche durch die Masse der Krystalllin ausgeübt wird: diese Bestimmung ist nicht direct ausführbar, weil wir die o tischen Constanten der Linse am lebenden Auge nicht ermitteln können, die Lin ausserdem nicht centrirt ist. Der Werth des wirklichen y bleibt daher unb kannt. Der Werth des wirklichen x, den wir mit ξ' bezeichnen wollen, läs sich auf einem Umwege annähernd bestimmen, und diese approximative B stimmung kann als genügend angesehen werden, weil der Punkt i sehr nahe de hinteren Knotenpunkte des Auges liegt. Ist für eine in Glaskörperflüssigk liegende Linse die Entfernung der Knotenpunkte von einander $= d$, die En fernung des Punktes i vom hinteren Knotenpunkte $= a$, die Brennweite der Lin $= \varphi$, so ist die scheinbare Verschiebung des Punktes i nach vorn $= d - \frac{a}{\varphi}$ Helmholtz hat für a an todten Linsen 1,546 bis 1,499 Mm. für φ 45,14 b 47,43 Mm., für d 0,203 Mm. gefunden, woraus sich ξ' um 0,150 bis 0,156 Mm grösser berechnet als x.

Für den wahren Abstand des hinteren Linsenscheitels von dem Hornhaut-
scheitel hat Helmholtz folgende Werthe gewonnen:

II = 7,089, III = 7,335, IV = 7,145,

Knapp für seine vier normalen Augen

V = 7,513, VI = 7,457, VII = 7,153, VIII = 7,101.

Als Mittel würden wir 7,2 Mm. anzunehmen haben.

Mandelstamm und Schöler (A. f. O. XVIII. 1. p. 177) fanden mittelst des
Mikrooptometers für ihre eigenen Augen folgende Werthe (a. a. O. mit $d + p + \varepsilon$
bezeichnet): M = 7,578, S = 7,122 Mm., und Reich (A. f. O. XX. 1. p. 219)
nach derselben Methode XVI = 7,647, XVII = 7,416, XVIII = 7,433 Mm.

Aus diesen sämmtlichen Bestimmungen ergiebt sich im Mittel der wahre
Abstand des hinteren Linsenscheitels von dem Hornhautscheitel
= 7,332.

Für den Werth y, d. h. den Abstand des hinteren Linsenscheitels von der
Hornhautaxe liegen nur Zahlenangaben von Helmholtz vor, welcher fand y bei

II = 0,026—0,133, III = 0,143—0,177, IV = 0,146—0,213 Mm.

Diese Werthe sind so gering, dass sie vernachlässigt werden können.

Ziehen wir nun den Werth, welchen wir für den Abstand des vorderen
Linsenscheitels von dem Hornhautscheitel erhalten haben, $= \xi$ ab von dem
Werthe ξ', dem Abstand des hinteren Linsenscheitels von dem Hornhaut-
scheitel, so erhalten wir den Werth für die Dicke der Linse. Das Mittel von
ξ' ist = 7,332, das Mittel für ξ war (§ 7) = 3,430, wir erhalten also $\xi' - \xi$
= 3,902 und können also in runder Zahl für die Dicke der Linse 4 Mm. an-
nehmen.

Dieser Werth weicht sehr wenig von den Befunden Krause's und Helmholtz's
an todten Linsen ab: Krause fand 4,05—5,4 Mm., Helmholtz 4,2 und 4,3 Mm.,
indess spricht er für die Annahme von Helmholtz, dass sich die Dicke der Linse
nach dem Tode vergrössert. Ob es sich hierbei um Imbibitionserscheinungen oder
um die Folge der Ablösung der Linse von ihren Verbindungen handelt, ist nicht
zu entscheiden. Letzteres ist indess, wie wir in § 15 sehen werden, sehr wahr-
scheinlich, da die Linse während des Lebens durch die *Zonula Zinnii* in Spannung
erhalten und abgeplattet wird, und nur im Zustande stärkster Accommodation die
ihrer Elasticität entsprechende natürliche Form annimmt; wir werden aber sehen,
dass die accommodirte Linse im Lebenden reichlich so dick gefunden wird, als
die Beobachtungen von Krause und Helmholtz für todte herausgenommene Linsen
ergeben. Nach Knapp nahm die Dicke der Linse bei der Accommodation im Mittel
seiner vier Augen von 3,8 Mm. auf 4,4 Mm. zu. (A. f. O. VI. 2. p. 38.)

§ 10. Krümmung der hinteren Linsenfläche. Wir haben schon
in § 8 bemerkt, dass die Krümmung der hinteren Linsenfläche an todten Linsen
von Helmholtz und Knapp zwischen 5,173 und 5,889 Mm. gefunden worden ist.

Am lebenden Auge misst man entweder die Grösse der Spiegelbilder der
hinteren Linsenfläche mit dem Ophthalmometer ähnlich wie bei der Hornhaut
(§ 4), oder man bestimmt die Brennweite des aus der hinteren Linsenfläche und
dem davor liegenden brechenden Systeme zusammengesetzten dioptrisch-katop-
trischen Systeme auf dieselbe Art, wie für die vordere Linsenfläche (§ 8). Es
wird dabei ebenso wie für die vordere Fläche der Linse die Annahme gemacht,

dass die Krümmung der hinteren Linsenfläche eine sphärische sei, was bei d Kleinheit des in Betracht kommenden Bogens erlaubt ist. Die Spiegelbilder d hinteren Linsenfläche sind scharf und lichtstark, aber sehr klein.

Die erste der beiden Methoden ist von Helmholtz und seinen Schüler Adamück und Woinow, Rosow, Strawbridge, Mandelstamm und Schöler, und Rei (von den drei letzten mit Benutzung des Mikrooptometers § 7) angewendet wo den. Die Platten des Ophthalmometers werden so eingestellt, dass man dr leuchtende Punkte mit zwei gleichen Zwischenräumen erhält. Aus der En fernung des leuchtenden Objectes von dem beobachteten Auge, der Grösse de selben und der mittelst des Ophthalmometers oder Mikrooptometers gemessene Grösse des Bildes berechnet man dann die Brennweite q des vor der hinter Linsenfläche gelegenen dioptrisch-katoptrischen Systems und aus dieser de Krümmungsradius r der hinteren Linsenfläche (§ 8).

Die zweite Methode, welche von Knapp (A. f. O. VI. 2. p. 34) angewend wurde, beruht darauf, dass man die Grösse der von der Hornhaut gespiegelte Bilder eben so gross macht, wie die der von der hinteren Linsenfläche zurüc geworfenen Bilder und aus den Entfernungen die Brennweiten bestimmt.

Indem wir wegen des Näheren auf § 8 verweisen, bemerken wir, dass der Formel für den Krümmungsradius der hinteren Linsenfläche q und r posit zu setzen sind, weil dieselbe als Concavspiegel wirkt, also

$$r = \frac{q\,(F_{,,} - d)^2}{\frac{1}{2} F_{,}\, F_{,,} - q\,(F_{,,} - d)} \quad . \; . \; . \; . \; . \qquad \text{XX}$$

Da ferner die Werthe $F_{,}$ und $F_{,,}$ nicht für das individuelle Auge berechn werden können, so hat man dafür die für das schematische Auge (s. § 11) sub stituirt und $F_{,} = 14{,}857$, $F_{,,} = 19{,}875$ gesetzt. d ist hier gleich dem Abstan des hinteren Linsenscheitels von dem zweiten Hauptpunkte des Auges. $F_{,,}$ — ist dann gleich der Entfernung des hinteren Brennpunktes des Auges von d Hinterfläche der Linse: setzen wir diese $= p$, so erhalten wir

$$r = \frac{q \cdot p^2}{\frac{1}{2} F_{,}\, F_{,,} - q \cdot p} \quad . \; . \; . \; . \; . \qquad \text{XXI}$$

Folgende Werthe sind für r gefunden worden:

Helmholtz: II = 5,83, III = 5,13, IV = 5,37,
Knapp: V = 5,355, VI = 5,487, VIII = 6.901, VIII = 6,499,
Rosow: IX = 6,125,
Adamück-Woinow: X = 6,063, XI = 6,216, XII = 7,600, XIII = 6,533,
Mandelstamm und Schöler: XIV = 6,409, XV = 6,331,
Reich: XVI = 6,587, XVII = 5,537, XVIII = 6,223,
Strawbridge: XIX = 5,302, XX = 5,701,
Woinow (Ophthalm. p. 112): XXI = 6,248, XXII = 7,190 Mm.

Im Mittel aus diesen 21 Bestimmungen an emmetropischen, myopischen u presbyopischen Augen ergiebt sich für den Krümmungshalbmesser d hinteren Linsenfläche 6,125 Mm.

§ 11. Die Cardinalpunkte des Auges. Wir haben in den vorhe gehenden Paragraphen die physikalischen und anatomischen Grundlagen g wonnen, um den Gang der Lichtstrahlen im lebenden Auge weiter bestimmen können. Nach den Besprechungen in § 2 werden wir die Cardinalpunk

es combinirten brechenden Systems im Auge zu bestimmen haben, um den Weg nden zu können, welchen ein beliebiger Lichtstrahl im Auge zu durchlaufen hat. ie Cardinalpunkte sind die beiden Brennpunkte, die beiden Hauptpunkte nd die beiden Knotenpunkte.

Zur Berechnung der Cardinalpunkte des Auges kann man so verfahren, dass ıan zuerst die Hauptbrennweiten, dann die Hauptebenen berechnet, woraus sich ann die Lage der Brennpunkte ergiebt. Die Lage der Knotenpunkte ergiebt sich ınn aus der Lage der Brennpunkte und aus den Hauptbrennweiten.

Für das Hornhautsystem haben wir schon in § 6 die vordere und hintere rennweite berechnet. Für eine einzige brechende Kugelfläche fallen die beiden auptpunkte in einen zusammen und liegen im Scheitelpunkte der Kugelfläche; ie Knotenpunkte fallen gleichfalls in einen zusammen, welcher im Mittelpunkte er Kugelfläche gelegen ist. Wir haben dann $F_{\prime\prime} = F_{\prime} n_1 = F_{\prime} + r$,

im Mittel für die vordere Brennweite $F_{\prime} = 22{,}5$ Mm.

- - - - hintere - $F_{\prime\prime} = 30{,}2$ -

In der Krystalllinse, die wir uns in Glaskörperflüssigkeit liegend denken, ind, weil das erste und dritte Medium einander gleich sind, auch die beiden rennweiten einander gleich, wie aus Formel 14ª) § 2 sich ergiebt. Setzen wir ie Brennweite der Krystalllinse $= \varphi$, so findet sich dasselbe, wenn wir mit n_1 en Brechungsexponenten der Glaskörperflüssigkeit, mit n_2 den totalen Brechungs- ıdex der Krystalllinse, mit $r_{\prime}$ den Krümmungsradius der vorderen, mit $r_{\prime\prime}$ den er hinteren Linsenfläche, endlich mit d die Dicke der Linse bezeichnen nach 14ª)

$$\varphi = \frac{n_1\, n_2\, r_{\prime}\, r_{\prime\prime}}{(n_2 - n_1)\left[n_2\,(r_{\prime\prime} - r_{\prime}) + (n_2 - n_1)\, d\right]}$$

n Mittel war $n_1 = 1{,}3376 = \frac{103}{77}$; $n_2 = 1{,}4545 = \frac{16}{11}$,

$r_{\prime} = 10$ Mm., $r_{\prime\prime} = -6{,}125$ Mm., $d = 4$ Mm., daraus ergiebt sich

$$\varphi = 44{,}934 \text{ Mm.}$$

Da die Hauptbrennweite die Distanz zwischen dem Hauptpunkte und dem rennpunkte bedeutet (§ 2, Figur 4), so werden wir durch Bestimmung der lauptpunkte auch zugleich die Lage der Brennpunkte bestimmen.

Die Entfernung der ersten Hauptebene von der vorderen Fläche der Krystall- nse findet sich nach Formel 15) (§ 2), wenn wir in derselben $n_3 = n_1$ setzen

$$h' = \frac{n_1\, d\, r_{\prime}}{n_2\,(r_{\prime\prime} - r_{\prime}) + (n_2 - n_1)\, d}$$

Die Rechnung ergiebt $h' = -2{,}2367$ Mm., wobei das negative Vorzeichen edeutet, dass h' innerhalb der Concavität der Linse gelegen ist. Entsprechend nden wir für $h'' = -\frac{n_2\, d\, r_{\prime\prime}}{n_2\,(r_{\prime\prime} - r_{\prime}) + (n_2 - n_1)\, d}$ en Werth $h'' = -1{,}3700$ Mm.

Hieraus können wir nun weiter die cardinalen Punkte für das ganze diop- rische System des Auges berechnen, indem wir erst wieder die beiden Haupt- rennweiten, dann die Hauptpunkte bestimmen.

Die erste Hauptbrennweite des Auges, welche wir mit F_1 bezeichnen vollen, findet sich aus den Brennweiten der Hornhaut und der Krystalllinse mit erücksichtigung der Distanz zwischen der zweiten Hauptebene des ersten und ler ersten Hauptebene des zweiten Systems, d. h. der Entfernung vom Horn- autscheitel bis zur ersten Hauptebene der Krystalllinse, welche wir mit d' be-

zeichnen wollen. Die Entfernung des Hornhautscheitels bis zur Vorderfläche de Krystalllinse haben wir in § 7 = 3,430 Mm. im Mittel gefunden; addiren wir h hinzu, so erhalten wir für $d' = 5{,}666$ Mm. Bezeichnen wir die Hauptbrenn weiten der Hornhaut mit $f_,$ und $f_{,,}$, so erhalten wir nach Formel 13) (§ 2)

$$F_1 = \frac{\varphi \cdot f_,}{\varphi + f_, - d'}$$

und die Rechnung ergiebt $F_1 = 14{,}197$ Mm.

Die zweite Hauptbrennweite ergiebt sich entsprechend

$$F_2 = \frac{\varphi \cdot f_{,,}}{\varphi + f_{,,} - d'} = F_1\, n_1 \text{, und berechnet sich}$$

$$F_2 = 18{,}990 \text{ Mm.}$$

Die Hauptebenen des Auges, welche wir mit H_1 und H_2 bezeichnen, ergebe sich nun weiter nach Formel 12) (§ 2), indem die Entfernung der ersten Haupt ebene des Auges von der ersten Hauptebene des ersten Systems, d. h. dem Horn hautscheitel

$$H_1 = \frac{d' f_,}{d' - \varphi - f_{,,}}$$

woraus $H_1 = -1{,}918$ Mm. sich berechnet.

Da der Werth negativ ist, so liegt die erste Hauptebene des Auges u 1,918 Mm. hinter dem Hornhautscheitel.

Die Entfernung der zweiten Hauptebene des Auges von der zweiten Haupt ebene des zweiten Systems (der zweiten Hauptebene der Krystalllinse) e giebt sich

$$H_2 = \frac{d' \varphi}{d' - \varphi - f_{,,}}$$

und findet sich daraus = 3,5716 Mm. Wollen wir die Entfernung der zweite Hauptebene in Bezug auf den Hornhautscheitel bestimmen, so müssen wir vo der Entfernung des Hornhautscheitels von der hinteren Fläche der Krystalllins abziehen die Distanz der zweiten Hauptebene des Auges von der zweiten Haupt ebene der Krystalllinse $= \xi' - (h_{,,} + H_2) = 7{,}332 - (1{,}370 + 3{,}571)$.

Die zweite Hauptebene des Auges liegt also (da H_2 negativ is 2,391 Mm. hinter dem Hornhautscheitel.

Aus der Lage der Hauptpunkte ergiebt sich nun die Lage der beiden Brenn punkte des Auges in Bezug auf den Hornhautscheitel, wenn wir di Entfernung des ersten Hauptpunktes von dem Hornhautscheitel $= -H_1$ addire zu der ersten Hauptbrennweite F_1, so dass die Rechnung für $F_1 - H_1$ ergiel $= 12{,}279$ Mm., und entsprechend $H_2 + F_2 = 21{,}380$ Mm.

Endlich finden wir die Lage der Knotenpunkte in Bezug auf de Hornhautscheitel aus der Lage der Brennpunkte und der Hauptbrenn weiten. Bezeichnen wir den ersten Knotenpunkt des Auges mit K_1, den zweite mit K_2, so finden wir die Entfernung des ersten Knotenpunktes von dem Horn hautscheitel, wenn wir die Distanz des ersten Brennpunktes vom Hornhautscheite abziehen von der zweiten Hauptbrennweite. Die Rechnung ergiebt

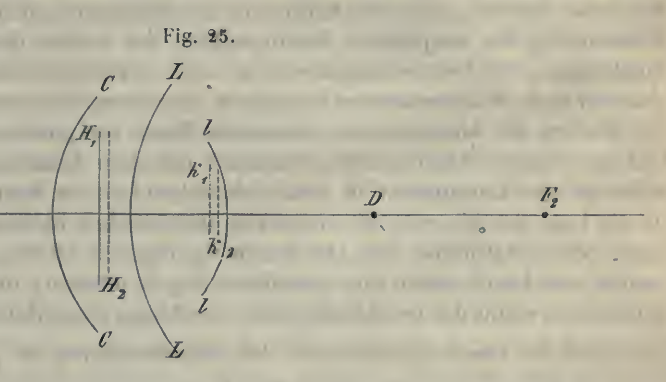
$$K_1 = 18{,}990 - 12{,}279 = 6{,}711 \text{ Mm.}$$

und entsprechend die Lage des zweiten Knotenpunktes, wenn wir von der erste Hauptbrennweite abziehen die Entfernung des zweiten Brennpunktes vom Horn hautscheitel, also $K_2 = F_1 - (H_2 + F_2) = -7{,}183$. — Oder wenn wir zu K die Distanz der beiden Hauptpunkte von einander addiren. Die Distanz de

eiden Hauptpunkte von einander findet sich aber = 0,472 Mm. (= $H_2 - H_1$) nd nach beiden Rechnungen auch $K_2 - K_1$ = 0,472 Mm.

Damit wäre die Lage der Cardinalpunkte für das Auge bestimmt. Wir geben Figur 25 eine Uebersicht derselben in dreifacher Vergrösserung der natürchen Verhältnisse des mittleren Auges. *CC* bedeutet die Hornhaut, *LL* die

Fig. 25.



rümmung der vorderen Linsenfläche, *ll* die der hinteren Linsenfläche, F_1, F_2 ie Brennpunkte, H_1 H_2 die Hauptebenen, k_1 k_2 die Knotenebenen. Endlich beeutet *D* die Lage des Drehpunktes, deren Bestimmung in § 68 besprochen erden wird.

Die folgende Tabelle giebt eine Uebersicht über die Lage der Cardinalpunkte Listing's schematischem Auge, in Helmholtz' (Physiol. Optik 111) scheatischem Auge, in Knapp's Auge V (normal), in Adamück und Woinow's Auge I (Presbyopic) und in dem nach den Mittelzahlen berechneten Auge.

Tabelle IV.

	Listing.	Helmholtz.	Knapp.	Adamück und Woinow.	Mittleres Auge.
F_1	— 12,8326	— 12,918	— 11,819	— 12,534	— 12,279
H_1	2,1746	1,940	2,132	1,705	1,918
H_2	2,5724	2,356	2,540	2,074	2,390
K_1	7,2420	6,957	6,821	6,506	6,711
K_2	7,6398	7,373	7,229	6,875	7,183
F_2	22,6470	22,231	21,180	21,114	21,380

§ 12. Das reducirte Auge. Wir sind mittelst der gefundenen Werthe n Stande, den Gang der einfallenden Lichtstrahlen im Auge zu construiren, so ie den Ort eines beliebigen, in der Nähe der Augenaxe gelegenen Punktes zu nden. Da aber einerseits die Berechnungen verschiedener Beobachter auch für ormale Augen mancherlei Differenzen ergeben, ferner die Fehlergrenzen der inzelbeobachtungen eine gewisse Breite haben, die man auf etwa 5% schätzen ann (man vergleiche die Auseinandersetzungen hierüber von Knapp (A. f. O. I. 2. p. 46 u. f.), so ist es erlaubt, eine weitere Reduction auf Mittelwerthe vornehmen, wie es Volkmann, Moser und Listing gethan haben (Listing, Dioptrik

im Handwörterbuch der Physiologie IV. 1853, p. 493). — Für ein reducirtes Auge würde zunächst die Annahme zu machen sein, dass dasselbe nur einen einzigen Knotenpunkt und einen einzigen Hauptpunkt hat. Die Lage der Brennpunkte würde dieselbe bleiben müssen. Da die Distanz der beiden Hauptpunkte oder der beiden Knotenpunkte nach allen Berechnungen weniger als ein halbes Millimeter beträgt, so ist die Reduction mit Rücksicht auf die vielen Vortheile bei Bestimmung der conjugirten Brennpunkte, der Grösse der Netzhautbilder, der Ausdehnung der Zerstreuungskreise u. s. w. wohl gerechtfertigt. Die Annahme eines einzigen Knotenpunktes würde die Annahme involviren, dass die brechenden Medien des Augapfels eine homogene Masse von gleichem Brechungsvermögen bildeten, deren Krümmungsmittelpunkt mit dem Knotenpunkt zusammenfiele, während der Hauptpunkt in dem Scheitelpunkte der Krümmung gelegen wäre. Da die Lage des hinteren Brennpunktes unverändert bleiben muss, wenn deutliches Sehen stattfinden soll, so würde F_2 ungefähr 19 Mm. hinter dem Scheitelpunkte des brechenden Augenmediums liegen müssen; diese Bedingung würde erfüllt sein, wenn die brechende Fläche des Auges einen Halbmesser von 4,75 Mm. hätte und das Brechungsvermögen des Augenmediums $= \frac{4}{3}$ oder 1,333 . . gesetzt würde, also ungefähr gleich dem Brechungsexponenten des Kammerwassers oder des Glaskörpers. Wir hätten dann nach Formel 4) (§ 2)

$$F_2 = \frac{n \cdot r}{n - 1} = \frac{\frac{4}{3} \cdot 4,75}{\frac{1}{3}} = 19 \text{ Mm.}$$

$$F_1 = \frac{r}{n - 1} = \frac{4,75}{\frac{1}{3}} = 14,25 \text{ Mm.}$$

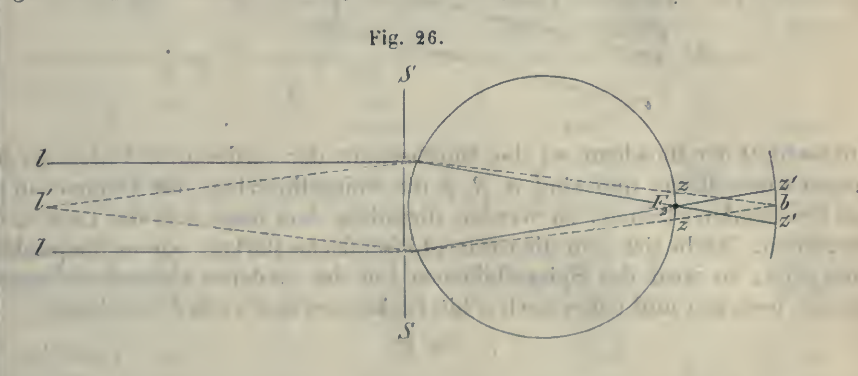
Noch einfacher nimmt Donders $F_2 = 20$, $r = 5$, $n = \frac{4}{3}$ an. In diesem Falle würde der Knotenpunkt 15 Mm. vor dem hinteren Brennpunkte liegen, eine Annahme, welche noch mehr dem Listing'schen und Helmholtz'schen schematischen Auge sich nähert und gewöhnlich den Berechnungen der Bildgrössen, Zerstreuungskreise u. s. w. zu Grunde gelegt wird. Wir werden im Folgenden gleichfalls diese Annahme machen und die Netzhaut im hinteren Brennpunkte des normalen ruhenden (nicht accommodirten) Auges 15 Mm. hinter dem Knotenpunkte gelegen rechnen.

§ 13. Die Accommodation des Auges. Mögen wir nun von den Brechungsverhältnissen eines individuellen, schematischen oder reducirten Auges ausgehen, so ergiebt sich, dass der zweite oder hintere Brennpunkt nur für solche Strahlen der Vereinigungspunkt sein kann, welche von einem unendlich entfernten Punkte kommen. Für Strahlen, welche von einem näher gelegenen leuchtenden Punkte kommen, muss, nach der Formel der conjugirten Brennpunkte, der Vereinigungspunkt der Strahlen im letzten Medium, oder der Bildpunkt hinter dem zweiten Brennpunkte liegen. Liegt nun in einem normalsichtigen (emmetropischen) Auge der Vereinigungspunkt für Strahlen, die von einem unendlich entfernten Punkte kommen, oder für parallele Strahlen, in der äussersten empfindenden Schicht der Netzhaut, so wird, da der Bildpunkt von einem näher

gelegenen leuchtenden Punkte hinter der Netzhaut liegen muss, ein Querschnitt des Strahlenkegels in der empfindenden Netzhautschicht liegen, und daher nicht ein Punkt, sondern eine kreisförmige Fläche auf der Netzhaut gebildet und empfunden werden. Von einem Objecte, welches aus einer Anzahl leuchtender Punkte besteht, wird also ein deutliches Bild nur entstehen können, wenn das Object sich in unendlicher Entfernung befindet; für nähere Objecte muss wegen der gegenseitigen Deckung der Kreisflächen ein undeutliches Bild entworfen werden. Soll aber der Bildpunkt eines näheren Objectes in die empfindende Netzhautschicht fallen, so muss entweder die empfindende Netzhautschicht sich von den Hauptpunkten oder dem Hornhautscheitel entfernen, oder die Brennweite der Augenmedien vermindert werden. Der letztere Fall ist der thatsächliche, und der Vorgang, durch welchen die Brennweite der Augenmedien verändert wird, heisst Accommodation des Auges.

Die Nothwendigkeit einer Accommodation des Auges ist schon von SCHEINER (Oculus, 1619, p. 32—49) erwiesen worden: der sogenannte Scheiner'sche Versuch besteht darin, dass man dicht vor die Pupille des Auges einen Schirm mit zwei kleinen Löchern bringt und in der Richtung der Sehaxe in verschiedenen Entfernungen von dem Auge Objecte (Nadeln) anbringt: erscheint das eine der Objecte einfach, so erscheint das nähere oder das entferntere Object doppelt. Ist in Figur 26 F_2 der hintere Brennpunkt des Auges für die parallelen Strahlen $l\,l$,

Fig. 26.



so liegt der Bildpunkt b von dem näheren leuchtenden Punkte l' hinter Netzhaut. Von dem von l' ausgehenden Strahlenkegel gehen Strahlen durch die Löcher des Schirmes $S\,S$ nach den Netzhautpunkten $z\,z$, afficiren also zwei differente Punkte der Netzhaut, woraus die Empfindung entsteht, als ob zwei Objecte da wären. Ist die Brechung der Medien aber von der Art, dass die Netzhaut sich in dem Vereinigungspunkte der von l' kommenden Strahlen befindet, so erscheint l' einfach, das Bild des unendlich entfernten Punktes, von dem die parallelen Strahlen $l\,l$ kommen, wird aber in $z'\,z'$ entworfen, daher erscheint derselbe jetzt in Doppelbildern.

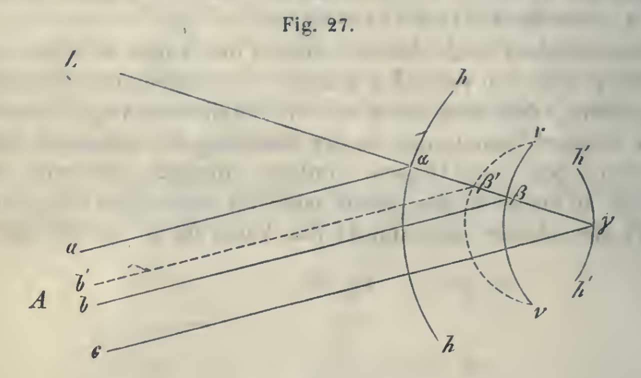
Der Vorgang, durch welchen die Brechung der Augenmedien so verändert wird, dass die Vereinigung der Lichtstrahlen, welche von verschieden entfernten Punkten kommen, immer in der empfindenden Netzhautschicht stattfindet, der Accommodationsvorgang beruht nun nach der Entdeckung von LANGENBECK (Klinische Beiträge 1849), DONDERS-CRAMER (Nederlansch Lancet 1849, p. 146 und

Tydschrift for Geneeskunde 1851, p. 115, Het Accommodatievermogen der Oogen, Haarlem 1853) und Helmholtz (A. f. O. I. 2, 1855, p. 1) auf einer Formveränderung der Linse, wobei namentlich die vordere Krümmungsfläche derselben convexer wird und der Scheitel sich dem Hornhautscheitel nähert, wenn das Auge für die Nähe accommodirt wird.

Der Nachweis, dass sich die vordere Linsenfläche bei der Accommodation für die Nähe stärker wölbt, ist geführt worden durch die Beobachtung, dass das von der vorderen Linsenfläche entworfene Spiegelbildchen seine Lage in Bezug auf das Reflexbildchen von der Hornhaut und von der hinteren Linsenfläche ändert und dass es kleiner wird, wenn man für die Nähe accommodirt.

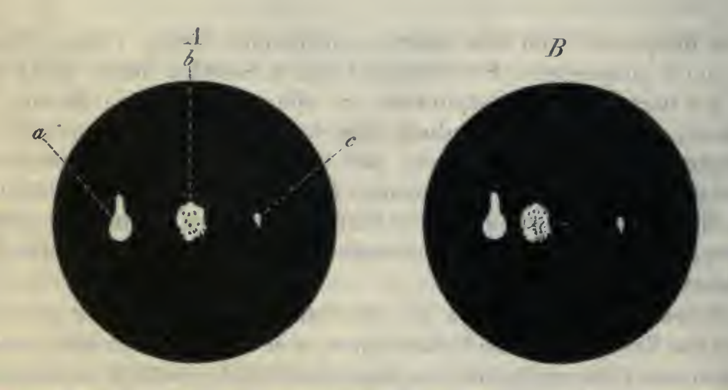
Befindet sich in L Figur 27 eine Lichtflamme, in A das mit einer Lupe oder einem Stubenfernrohr bewaffnete Auge des Beobachters und bedeutet hh den

Fig. 27.



Durchschnitt der Hornhaut, $\nu\nu$ den Durchschnitt der vorderen, $h'h'$ den der hintereren Linsenfläche und sind α, β, γ die Spiegelbildchen der Flamme an den drei brechenden Flächen, so werden dieselben dem Auge A in der Lage a, b, c erscheinen. Wölbt sich nun die vordere Linsenfläche stärker, wie es die punktirte Linie zeigt, so wird das Spiegelbildchen von der vorderen Linsenfläche nach β' hin sich bewegen und näher nach a hin rücken, so dass es in b' erscheint.

Fig. 28.



Während also dem Beobachter die drei Reflexbilder des in die Ferne blickenden Auges so wie in Figur 28 A erscheinen (a das Cornealreflexbild, b das Reflex-

bild von der vorderen, *c* das Reflexbild von der hinteren Linsenfläche), haben sie beim Fixiren eines nahen Objectes die Lage wie in Figur 28 *B*. (Cf. III, 1 dieses Handbuches p. 220.)

Genauer lässt sich die Krümmungsveränderung der vorderen Linsenfläche bestimmen und messen mittelst der Helmholtz'schen Beobachtungsmethode, wie sie in § 8 beschrieben worden ist, und mittelst des Mikrooptometers, welches ebendaselbst besprochen worden ist. Alle Beobachtungen von Helmholtz und seinen Schülern Knapp, Woinow, Adamück, Mandelstamm, Schöler, Reich haben ergeben, dass bei der Accommodation für die Nähe bei emmetropischen, myopischen, presbyopischen und hypermetropischen Augen die vordere Linsenfläche sich ganz bedeutend stärker wölbt, zugleich aber auch die hintere Linsenfläche etwas convexer, die Linse also zugleich dicker wird.

Wir stellen in der folgenden Tabelle V. die Beobachtungen verschiedener Forscher zusammen, indem wir die Abnahme des Krümmungshalbmessers der vorderen, die des Krümmungshalbmessers der hinteren Linsenfläche und endlich die Dickenzunahme der Linse angeben.

Tabelle V.

Beobachter.		Der Radius der vorderen Linsenfläche nimmt ab in Mm.	Der Radius der hinteren Linsenfläche nimmt ab in Mm.	Zunahme der Linsendicke in Mm.
Helmholtz	II. . . .	3,3		
	III. . . .	2,9		
Knapp	V. . . .	2,376	0,697	0,558
	VI. . . .	3,060	0,533	0,554
	VII. . . .	3,053	1,292	0,684
	VIII. . . .	4,035	1,414	0,636
Adamück und Woinow (Presbyopen)	X. . . .	1,559	1,307	0,703
	XI. . . .	1,605	1,216	0,247
	XII. . . .	1,804	1,222	0,393
	XIII. . . .	1,742	0,904	0,556
Mandelstamm und Schöler (Myopie)	XIV. . . .	3,053	1,360	0,575
	XV. . . .	3,663	0,667	0,267
Reich (Myopie)	XVI. . . .	4,472	1,600	0,396
	XVII. . . .	3,183	0,955	0,456
	XVIII. . . .	2,992	1,025	0,562
Woinow (Hypermetr.)	XX. . . .	4,088	1,277	0,615

Es ist ausserdem übereinstimmend von allen Beobachtern gefunden worden, dass bei der Accommodation für die Nähe keine Veränderung in der Krümmung der Hornhaut eintritt, womit zugleich die Annahme einer Verlängerung der Sehaxe, eines Zurückweichens der Netzhaut von dem Corneascheitel sehr unwahrscheinlich wird. Nur darüber sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen, ob bei der Accommodation eine Verschiebung des hinteren Linsenscheitels nach der Hornhaut hin stattfindet: jedenfalls ist dieselbe sehr gering und variabel (cf. Reich, A. f. O. XX. 1. p. 222).

Die Hauptfrage ist nun, ob die beobachteten Veränderungen der Linse die Brechung der Augenmedien so verändern, dass die von dem leuchtenden Punkte kommenden Strahlen immer in derselben Entfernung vom Hornhautscheitel, d. h. auf der Netzhaut vereinigt werden, mag der leuchtende Punkt ferner oder näher sein. Diese Frage ist von Knapp einer eingehenden Untersuchung unterworfen worden. (A. f. O. VI. 2. p. 42.)

Unter der Annahme, dass beim Fernsehen der hintere Brennpunkt in die Netzhaut fällt, rückt derselbe beim Nahesehen vor die Netzhaut, so dass nun Strahlen, die von einem näheren Punkte ausgehen, in der Netzhaut ihren hinteren Vereinigungspunkt finden. Ist nun bei den Messungen ein sehr oder ∞ entfernter Punkt das erste Mal, ein Punkt in gewisser geringer Entfernung das zweite Mal fixirt worden, so muss sich aus den Veränderungen der Brechungsmedien die Entfernung desjenigen Punktes vom Auge, welcher das zweite Mal fixirt worden ist, berechnen lassen. Es ist bekannt die erste und zweite Brennweite des nahesehenden Auges F_1 und F_2, so wie der Abstand der Netzhaut von der zweiten Hauptebene, welcher p_1 sein möge: die dazu gehörige vordere Vereinigungsweite p, d. h. der Abstand des fixirten Punktes von der ersten Hauptebene ist zu finden nach der Formel der conjugirten Brennpunkte 5) (§ 2)

$$\frac{F_1}{p} + \frac{F_2}{p_1} = 1$$

F_1 und F_2 sind zu berechnen nach § 11, p_1 wird gefunden, indem man den Cornealabstand des zweiten Hauptpunktes beim Nahesehen abzieht von dem Cornealabstande des zweiten Brennpunktes beim Fernesehen.

Aus der Formel findet sich

$$p = \frac{F_1 \, p_1}{p_1 - F_2}$$

Knapp fand nun in den vier von ihm untersuchten Augen für p sehr annähernd die Werthe, welche der fixirte Punkt beim Nahesehen gehabt hatte, nämlich

	V.	VI.	VII.	VIII.
nach den Messungen berechnet	168 Mm.	114 Mm.	105 Mm.	97 Mm.
wirklicher Abstand	107 Mm.	110 Mm.	115 Mm.	87 Mm.

Die Differenz bei V glaubt Knapp daraus erklären zu können, dass die betreffende Person nicht genau auf 107 Mm. (die Entfernung des Gesichtszeichens) accommodirt gewesen sei. Damit sind auch die Messungen von Woinow, Adamück und Woinow, Strawbridge, Mandelstamm und Schöler, Reich in Uebereinstimmung.

Wir sind demnach zu der Annahme berechtigt, dass die Accommodation des Auges für die Nähe lediglich auf der Formveränderung der Krystalllinse beruht.

Ein Auge ohne Linse (aphakisches Auge) werden wir demnach als völlig accommodationslos ansehen müssen — was Donders gegenüber Foerster's Untersuchungen aufrecht erhalten hat. (Cf. Donders, Anomalien der Refraction und Accommodation 1866, p. 266. — Foerster, Klinische Monatsblätter X, 1872, p. 39. — Donders, Ueber scheinbare Accommodation bei Aphakie, A. f. O. XIX. 1. p. 60.)

Indem wir wegen der Werthe zur Berechnung von p auf die Abhandlungen der angeführten Forscher verweisen, wollen wir nur für Auge V die Werthe von Knapp anführen. Die erste Brennweite des nahesehenden Auges beträgt 12,847 Mm. = F_1, die zweite 18,640 Mm.

$= F_2$, der zweite Brennpunkt des fernesehenden Auges liegt 21,180, der zweite Hauptpunkt des nahesehenden Auges 2,954 Mm. hinter dem Hornhautscheitel, p_1 ist also = 21,180 — 2,954 Mm. = 18,586 Mm. Daraus ist p = 168 Mm.

Wir fügen hier noch die Tabelle, welche Helmholtz für die optischen Constanten und die Cardinalpunkte seines schematischen Auges giebt, hinzu, in welcher sich zugleich die accommodativen Veränderungen derselben übersehen lassen. (Physiol. Optik p. 111.)

Tabelle VI.

	Accommodation für die Ferne	Accommodation für die Nähe
Hornhautradius	8,0	8,0
Radius der vorderen Linsenfläche	10,0	6,0
- - hinteren -	6,0	5,5
Ort des vorderen Linsenscheitels	3,6	3,2
- - hinteren -	7,2	7,2
Vordere Brennweite der Hornhaut	23,692	23,692
Hintere - - -	31,692	31,692
Brennweite der Linse	43,707	33,785
Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse von der vorderen Fläche	2,1073	1,9745
Abstand des hinteren Hauptpunktes von der hinteren Fläche	1,2644	1,8100
Abstand der beiden Hauptpunkte der Linse von einander	0,2283	0,2155
Hintere Brennweite des Auges	19,875	17,756
Vordere - - -	14,858	13,274
Ort des vorderen Brennpunktes	— 12,918	— 11,241
- - ersten Hauptpunktes	1,940	2,033
- - zweiten -	2,356	2,492
- - ersten Knotenpunktes	6,957	6,515
- - zweiten -	7,373	6,974
- - hinteren Brennpunktes	22,231	20,248

§ 14. Die Accommodationsbreite. Donders bezeichnet die Distanz zwischen dem fernsten Punkte, welcher deutlich gesehen werden kann, und dem nächsten Punkte, welcher deutlich gesehen werden kann, als das Accommodationsbereich des Auges und nennt den ersteren Punkt den Fernpunkt, den zweiten den Nahepunkt.

Denken wir uns ein accommodationsloses Auge, dessen Fernpunkt unendlich weit entfernt ist, welches also z. B. einen Fixstern ganz scharf sehen kann, so wird, wenn vor dasselbe eine Convexlinse von gewissem Brechungsvermögen gebracht wird, ein Punkt in unendlicher Entfernung nicht mehr deutlich gesehen werden können, wohl aber ein Punkt z. B. in 100 Mm. Entfernung von dem Auge. Wir werden nun die Accommodationsbreite des Auges einer Linse gleichsetzen können, welche den von dem Nahepunkte ausgehenden Strahlen eine solche Richtung giebt, als kämen sie von einem ∞ entfernten Punkte: Für eine

biconvexe Linse in Luft geht aber die Formel 5) für die conjugirten Punkte, da dann die erste Brennweite der zweiten Brennweite gleich ist, über in die einfachere Form $\frac{1}{f_{\prime}} + \frac{1}{f_{\prime\prime}} = \frac{1}{F_{\prime}}$ oder $\frac{1}{f_{\prime}} = \frac{1}{F_{\prime}} - \frac{1}{f_{\prime\prime}}$. Bezeichnen wir für unsern Fall die Brennweite der Linse mit A, die Distanz des Fernpunktes mit R und die Distanz des Nahepunktes mit P, so sollen die von dem Nahepunkte kommenden Strahlen so gebrochen werden, als kämen sie von einem unendlich entfernten Punkte. Dies wird der Fall sein, wenn der Focus der Linse mit dem Nahepunkte zusammenfällt. Wir können also auch die Accommodationsbreite $= \frac{1}{A}$ setzen, der Nahepunkt P ist dann, wenn der Fernpunkt $R = \infty$ ist, auch $= A$: soll also ein Auge von ∞ auf 100 Mm. sich accommodiren, so muss eine Linse von 100 Mm. Focus vor das Auge, oder eigentlich in den Knotenpunkt des Auges gebracht werden.

Setzen wir die Accommodationsbreite nach Donders $= \frac{1}{A}$, so ergiebt sich, wenn wir den Abstand des Fernpunktes $= R$, den des Nahepunktes $= P$ setzen, die Relation

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{P} - \frac{1}{R} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad \alpha$$

Liegt der Fernpunkt R unendlich entfernt, so wird $\frac{1}{A} = \frac{1}{P}$, und findet sich P in 100 Mm. Entfernung von dem Auge, so würde die Accommodationsbreite durch den Bruch $= \frac{1}{100}$ Mm. auszudrücken sein. Da es aber hergebracht ist, die Brennweite der Linsen nicht nach Millimetern, sondern nach Pariser oder Rheinländischen Zollen zu bestimmen (1 Pariser Zoll = 27 Mm., 1 Rheinländischer Zoll = 26,15 Mm.), so würde, wenn von ∞ bis auf 4 Zoll accommodirt werden kann, die Accommodationsbreite $= \frac{1}{4}$ zu setzen sein*).

Diese Accommodationsbreite findet man in normalen oder emmetropischen Augen. Sie ändert sich zunächst mit dem Alter: Leute von über 50 Jahren z. B. können meist nur noch Punkte in 12 Zoll Entfernung deutlich sehen, während $R = \infty$ geblieben ist, ihre Accommodationsbreite würde also ausgedrückt sein durch $\frac{1}{12}$. Ein solches Auge ist ein presbyopisches: aus Adamück und Woinow's ophthalmometrischen Bestimmungen geht hervor, dass bei solchen Augen die Formveränderung der Linse nicht so bedeutend ist, wie bei emmetropischen Augen (s. § 13 Tabelle V). Augen, bei denen der Fernpunkt nicht in ∞ Entfernung liegt, sondern näher, heissen myopische oder kurzsichtige: ihre Accommodationsbreite kann ebenso gross, wie die des emmetropischen Auges sein: z. B. bei $R = 12$ $P = 3$ würde $\frac{1}{A} = \frac{1}{3} - \frac{1}{12} = \frac{1}{4}$. Endlich giebt es Augen, bei denen der Fernpunkt weiter als ∞ entfernt liegt, d. h. welche ohne Accommodation nur convergirende Strahlen auf der Netzhaut zur Vereinigung bringen, also sehr ferne Objecte ohne Accommodation nur bei Anwendung von Convexlinsen deutlich sehen, mittelst Accommodation aber Objecte in ziemlicher Nähe: so kann z. B. bei Ausschluss der Accommodation ein Convexglas von

*) Wegen der Benutzung des Metermaasses und der Annahme einer Meterlinse als Einheit muss ich auf den Aufsatz von Professor Nagel (Klinische Monatsblätter 1874, p. 362) und auf dessen Bearbeitung der Accommodations- und Refractionsanomalien (Cap. X dieses Handbuches) verweisen.

3 Zoll Focus zum deutlichen Sehen in grösste Ferne erforderlich sein, R also $= -\frac{1}{8}$ werden, mit Accommodation aber Punkte in 8 Zoll Entfernung deutlich sehen: die Accommodationsbreite ist dann $\frac{1}{A} = \frac{1}{8} - \left(-\frac{1}{8}\right) = \frac{1}{4}$. (cf. Donders, Anomalien, p. 79.)

Die aphakischen Augen haben eigentlich keine Accommodationsbreite, da ihnen das Accommodationsorgan fehlt: sie sind hypermetropisch, insofern sich nur Strahlen, welche convergirend die Hornhaut treffen, auf der Netzhaut vereinigen können: es ist für ein solches Auge also zunächst eine Convexlinse zu ermitteln, welche ein Sehen in grösste Ferne möglich macht: sei dies eine Linse von 3 Zoll Focus. Bei einer Linse von so starkem Brechungsvermögen kommt nun sehr in Betracht die Verrückung des Hauptpunktes des Auges und damit des Brennpunktes. Liegt der Hauptpunkt eines aphakischen Auges im Scheitelpunkte der Hornhaut, der (mittlere) Hauptpunkt der Linse $1/2$ Zoll vor dem Hornhautscheitel, so muss der gemeinschaftliche Hauptpunkt des ganzen Systems (Auge + Linse) weiter nach vorn rücken nach den Formeln 12) (§ 2), und er wird noch weiter nach vorn rücken müssen, wenn sich die Linse 1 Zoll vor der Hornhaut befindet, ja wenn sie sich 3 Zoll vor dem Auge befände, so würde der Brennpunkt der Linse in den Hornhautscheitel fallen.

Ist z. B. P die Entfernung des Nahepunktes, F der Focus der Linse, x die Entfernung vom Hornhautscheitel im ersten Falle und $x + x'$ im zweiten Falle, so muss sich die Entfernung von P vermindern im zweiten Falle. Denn im ersten Falle ist

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{F} - \frac{1}{F+x} \quad \text{also} \quad P = \frac{F \cdot (F+x)}{x}$$

im zweiten Falle ist

$$\frac{1}{P_2} = \frac{1}{F} - \frac{1}{F+x+x'} \quad \text{also} \quad P_2 = \frac{F \cdot (F+x+x')}{x+x'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \beta)$$

Ist also $F = 3$ Zoll, $x = x' = \frac{1}{2}$ Zoll, so findet sich $P = 21$ Zoll, $P_2 = 12$ Zoll. Das heisst: durch Verschieben der Linse vor dem Auge um $\frac{1}{2}$ Zoll kann der Aphakische von 21 Zoll auf 12 gewissermassen accommodiren, oder eine Accommodationsbreite von $\frac{1}{28}$ ersetzen.

Eine ähnliche Correctur, wie bei Linsen für aphakische Augen (Staarbrillen), ist auch erforderlich für alle anderen Hülfslinsen oder Brillen, indess kommt sie bei schwächeren Linsen weniger in Betracht. (cf. Donders, A. f. O. I. p. 172, Anomalien der Refraction, p. 121 u. p. 263.)

§ 15. Mechanismus der Accommodation. Der Mechanismus, durch welchen die stärkere Wölbung der Krystalllinse an ihrer vorderen und in geringerem Grade auch an ihrer hinteren Wölbung zu Stande kommt, ist noch nicht vollkommen klar. Im Wesentlichen ist die Hypothese von Helmholtz durch die späteren Untersuchungen bestätigt worden. Nach Helmholtz wird im ruhenden Zustande beim Sehen in die Ferne die Linse durch die an ihrem Rande befestigte *Zonula Zinnii (Zonula ciliaris)* gespannt erhalten, dadurch ihr Aequatorialdurchmesser vergrössert, ihre Axe aber verkürzt — wenn dagegen bei der Accommodation für die Nähe der Zug der *Zonula Zinnii* nachlässt, so wird vermöge ihrer Elasti-

cität die Aequatorialfläche der Linse kleiner, die Axe derselbe grösser werden. (Helmholtz, Phys. Optik p. 110.) Die Abspannung de Zonula würde aber bewirkt werden durch die Zusammenziehun der Radial- und Circulärfasern des Ciliarmuskels.

Es würde also die Accommodation für die Ferne dem Ruhezustande de Auges entsprechen, wie wir schon in den vorhergehenden Paragraphen ange nommen haben, die Accommodation für die Nähe würde der active, durch Muskel kräfte hergestellte Vorgang sein. Dafür spricht 1) dass bei der Accommodatio für die Nähe das Gefühl einer Anstrengung sich bemerkbar macht und sehr deut lich hervortritt, wenn längere Zeit für eine sehr grosse Nähe, für den Nahepunkt accommodirt wird — während das Gefühl der Anstrengung sofort aufhört, wen man für die Ferne accommodirt. — Beweisend ist diese Beobachtung nicht, we mit der Accommodation für die Nähe eine entsprechende Convergenz des Auge verbunden ist, welche für sich genügt, das Gefühl der Anstrengung hervorzurufen 2) Wenn man für die Nähe accommodirt, so dauert es länger, bis man den Nahe punkt scharf sieht, als es dauert, bis man das Auge wieder auf den Fernpunk eingestellt hat. Vierordt (Archiv für physiologische Heilkunde 1857, Neu Folge I. p. 17) fand die Zeit für die Accommodation von Fern auf Nah constan erheblich grösser, als von Nah auf Fern, im Mittel aus den sehr zahlreichen Ver suchen im Verhältniss von 135 zu 100 — wurde von einem 18 Meter entfernte Objecte auf ein 100 Mm. entferntes Object accommodirt, so waren bei Vierordt 1,18 Secunden, bei Accommodation in umgekehrter Richtung nur 0,84 Secunde erforderlich. Ebenso hat Aeby (Zeitschrift für rationelle Medicin 1861, Neu Folge XI. p. 300) für die Accommodation von 430 Mm. auf 115 Mm. erforderlic gefunden eine Zeit von beinahe 2 Secunden, in umgekehrter Richtung 1,2 Secun den. 3) Von Hensen und Völckers (Experimentaluntersuchung über den Mecha nismus der Accommodation, Kiel 1868) ist bei Versuchen an Hunden und späte auch an Katzen, einem Affen und an einem menschlichen Bulbus unmittelba nach der Enucleation (A. f. O. XIX. 1. p. 156) der directe Nachweis geführ worden, dass bei Reizung des *Ganglion ciliare* die vordere Linsenfläche convexe wird, der Ciliarmuskel sich zusammenzieht und die Chorioidea durch ihn nac vorn gezogen wird — auch dass nach dem Aufhören der Reizung der vorder Linsenscheitel wieder nach hinten zurückgeht und zwar stets rascher, als e nach vorwärts geht (p. 30). Hensen und Völckers bezeichnen denn auch m »Accommodation« nur die Einstellung für die Nähe, und sehen die Einstellung f die Ferne als ein Zurückgehen in die Ruhelage vermöge der Elasticität der Lins und ihrer Fasern an. 4) Wenn bei Oculomotoriuslähmung des Menschen da Accommodationsvermögen total verloren gegangen ist, so ist nach Donders (Ano malien, p. 19) das Auge auf den Fernpunkt eingestellt und durch Einträufeln vo Atropin wird in dem Refractionszustande nichts geändert. 5) Die grössere Dick von todten Linsen, die von ihrer Verbindung mit der Zonula gelöst sind, so wi die stärkere Krümmung derselben (§ 8 und § 9) können auch für diese Annahm angeführt werden, um so mehr, da Arlt an todten Linsen, welche in ihrer Ver bindung mit der Zonula geblieben waren, eine geringere Dicke angiebt (Arlt A. f. O. III. 2. p. 96: $1^4/_5$ Wiener Linie = 3,95 Mm.).

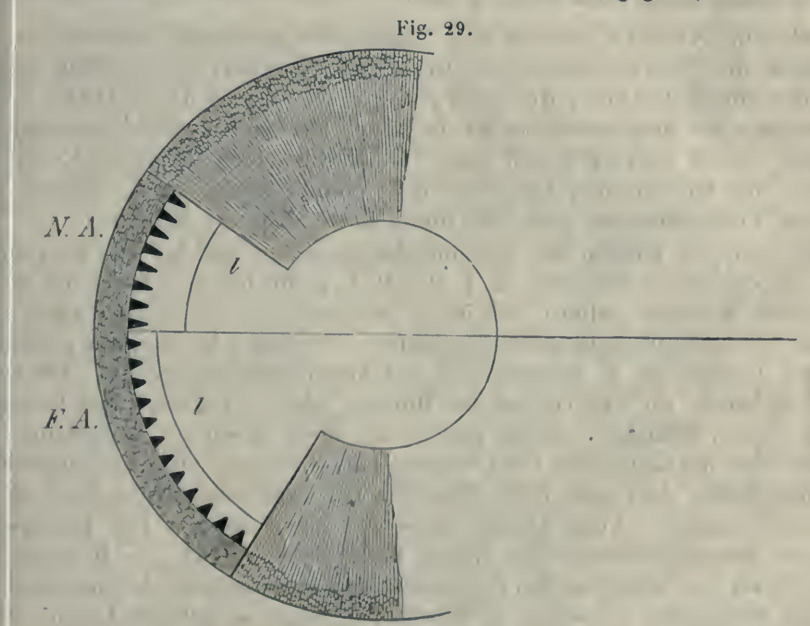
Wenn nun eine Abspannung der Zonula bei der Accommodation angenomme werden muss, so wird eine solche sehr wohl zu Stande kommen können durc

Contraction der Radial- und Circulärfasern des Ciliarmuskels. Die circulären Fasern desselben werden eine Verengerung des Ringes, den er bildet, bewirken müssen, wenn ein irgend dehnbares Gewebe sie umgiebt, als welches sich das Gewebe der Ciliarfortsätze erweist (s. Figur 2 Capitel III. Bd. I. 1. p. 270 dieses Handbuches); und wenn ferner nach Hensen und Völckers' Beobachtungen die Chorioidea durch die Radialfasern dieses Muskels nach vorn gezogen wird, so wird daraus auch wieder eine Abspannung der Ciliarfortsätze und damit der Zonula resultiren.

Wenn wir nun damit die Rolle des Ciliarmuskels bei der Accommodation als erklärt ansehen wollen, so ist doch noch unklar die Betheiligung der Ciliarfortsätze an derselben. L. Fick (Müller's Archiv 1853, p. 456) hat an den Augen weisser Kaninchen Bewegungen der Ciliarfortsätze bei directer Reizung eintreten sehen, nachdem er die Hornhaut weggeschnitten und die Iris zurückgeschlagen hatte. Dasselbe haben Hensen und Völckers (l. c. p. 37) am Hunde gesehen — ohne etwas daraus für die Vorgänge bei der Accommodation zu schliessen.

Die Beobachtungen über die Bewegungen der Ciliarfortsätze beim menschlichen Auge widersprechen einander: Becker (in Donders, Anomalien 1866, p. 25 und Wiener Med. Jahrbücher 1863 u. 1864) sah an albinotischen Augen eine Entfernung der Ciliarfortsätze von der Sehaxe eintreten bei Accommodation für die Nähe, bei Accommodation für die Ferne und nach Atropineinträufelung aber ein Vorrücken der Ciliarfortsätze nach der Sehaxe hin — er beobachtete ausserdem, dass die Ciliarfortsätze niemals die Linse berühren, ein Druck derselben auf die Linse daher niemals stattfinden kann. — Coccius dagegen (Der Mechanismus

Fig. 29.



der Accommodation des menschlichen Auges, Leipzig 1868) hat an iridektomirten gerade das Gegentheil beobachtet, dass nämlich bei der Accommodation für die Nähe die Ciliarfortsätze sämmtlich nach vorn zu treten und hierbei etwas an-

schwellen, beim Sehen in die Ferne aber wieder zurückgehen und kleiner werde
auch nach Atropinwirkung auffallend zurückgezogen erscheinen. Coccius' Al
bildung Figg. I und II zeigen diese Verhältnisse: wir geben seine erste Zeichnur
in Figur 29 wieder, wo *N. A.* die Nähestellung, *F. A.* die Fernestellung, *l l* de
Linsenrand bedeutet. Coccius hat mittelst seiner Beobachtungsmethode auch d
Zonula Zinnii als grauweisse Membran beobachten können, welc
zwischen hellweissen radiirten Bändern ebenso regelmässig gestellte dunkle Bä
der hat: bei Accommodation für die Ferne erscheinen diese Bänder kurz, b
Accommodation für die Nähe werden sie länger und erscheinen auch deutli
breiter. Gegen Becker, welcher die Veränderung der Ciliarfortsätze mit häm
statischen Veränderungen in Zusammenhang bringt, statuirt Coccius nur ei
Muskelwirkung, also Bewegung in Folge der Contraction oder Erschlaffung d
Ciliarmuskels (p. 21).

Die Beobachtungsmethode von Coccius besteht im Wesentlichen darin, dass mitte
eines kleinen 16 Mal vergrössernden Mikroskops die iridektomirte Stelle beobachtet und da
mittelst eines an dem Objectiv befestigten Concavspiegels das von einer Schiebelampe kommen
Licht auf den zu beobachtenden Theil geworfen wird. Der Beobachtete hat auf Objecte, d
in verschiedener Entfernung aufgestellt sind, zu accommodiren. Das Nähere, sowie zwei a
dere Methoden s. bei Coccius p. 8 u. f.

Coccius' Beobachtungen harmoniren mit den Beobachtungen und Schlüssen von Hens
und Völckers — indess müssen wir auf einen Widerspruch von Coccius' Beobachtungen n
denen von Vierordt und Aeby aufmerksam machen, indem Coccius angiebt, »dass die Lin
eine längere Zeit der Bewegung zum Zustande ihrer vollkommen erreichten Ruhe braucht,
bei der Bewegung für ein nahes Object« (p. 152).

Ueber die Nerven, welche den Accommodationsvorgang beherrschen,
nun durch die Untersuchungen von Hensen und Völckers unzweifelhaft festg
stellt, dass durch Reizung des *Ganglion ciliare* und der Ciliarnerv
die Vorgänge der Accommodation für die Nähe, also eine Zusammenziehung d
Musculus ciliaris hervorgebracht wird. Es macht keinen Unterschied, ob d
Ganglion oder ein einzelner Ciliarnerv beim Hunde gereizt wird. Hensen u
Völckers' Untersuchungen gelten für Hund, Katze, Affe und Mensch.

Die weiteren Bahnen der Accommodationsnerven sind bis jetzt ganz unb
kannt. Trautvetter's Versuche (A. f. O. XII. 1. p. 96) haben in Bezug auf Hun
zu keinem Resultate geführt, ob im *N. oculomotorius*, *trigeminus* oder *sy
pathicus* die Accommodationsfasern verlaufen — dagegen hat derselbe gefunde
dass bei Tauben der *N. oculomotorius* der Accommodationsnerv ist. Die neg
tiven Ergebnisse, die Trautvetter bei Hunden erhielt, verbieten eine Genera
sirung dieses Befundes, indess spricht die oben erwähnte Bemerkung v
Donders über die Coincidenz von Oculomotorius-Lähmung mit Accommodation
Lähmung dafür, dass auch beim Menschen der Oculomotorius die Accommod
tionsfasern enthält. Auch Alfred Gräfe hat einen solchen Fall beschrieb
(Klinische Motilitätsstörungen des Auges, Berlin 1858, p. 152). — In einem F
von v. Gräfe war allerdings bei Oculomotorius-Lähmung keine Accommodation
paralyse vorhanden, es waren in diesem Falle sogar sämmtliche Augenmusk
nerven gelähmt (A. f. O. II. 2, p. 301).

Bei dem innigen Connex zwischen Convergenz der Augenaxen und Accomm
dation für die Nähe muss gleichwohl ein Centralorgan für beiderlei Innervation

ngenommen werden — indess ist kein solches bis jetzt nachgewiesen, auch DAMÜCK lässt es bei seinen später zu besprechenden Versuchen (s. Association er Augenbewegungen § 76) dahingestellt, ob mit der Verengung der Pupille ccommodation eingetreten ist. (Med. Centralblatt 1870, p. 66.)

Die Bewegungen der Iris stehen in keinem directen Zusammenhange mit den ccommodationsbewegungen, sondern sind denselben nur associirt, allerdings mit nem auffallenden Zwange.

§ 16. Die Irisbewegungen. Die Iris hat als das einzige Diaphragma es brechenden Systems der Augenmedien einen sehr wesentlichen Einfluss auf en Gang der Lichtstrahlen: von der Weite der Pupille ist abhängig die Menge er Lichtstrahlen, welche in das Auge gelangen, indem die Pupille die Basis des ichtkegels im Auge darstellt. Die Weite der Pupille ist daher massgebend 1) für ie Intensität des zur Netzhaut gelangenden Lichtes, 2) für die Schärfe des auf er Netzhaut entworfenen Bildes oder die Genauigkeit, mit welcher die von einem unkte ausgehenden Lichtstrahlen sich wieder in einem Punkte vereinigen.

Die Weite der Pupille ist individuell sehr verschieden: bei den ophthalometrischen Messungen, also unter sehr ähnlichen äusseren Bedingungen ist der upillardiameter bei Accommodationsruhe zwischen 2,455 und 5,82 Mm. geınden worden (WOINOW, Ophthalmometrie p. 84). Bei jüngeren Individuen ist nter sonst gleichen Umständen die Pupille weiter, als bei alten Individuen; rünnette Individuen mit stark pigmentirter Iris haben eine weitere Pupille, als londe Individuen mit blauer Iris.

Eine Verengung der Pupille tritt ein 1) durch Lichtreize, welche die Netzaut treffen, und zwar um so stärker, je intensiver das Licht ist, je grösser die etroffene Netzhautfläche ist und je näher der *Fovea centralis* oder dem Gesichtsunkte (Kernstelle) der Lichtreiz liegt. Wir finden ausserdem, dass beim enschen ein Connex der beiden Netzhäute in Bezug auf die Pupillenweite stattndet: wird nur eine Netzhaut vom Licht afficirt, so ziehen sich beide Pupillen usammen, so dass unter normalen Verhältnissen beide Pupillen immer gleich eit sind. Beobachtet man z. B. bei einem auf den hellen Himmel oder eine elle Flamme blickenden Menschen das rechte Auge und verdeckt abwechselnd as linke Auge gegen das Licht, so tritt bei Verdeckung des linken Auges stets ine gleich grosse Erweiterung, bei Erhellung eine gleich grosse Verengung der upillen auf beiden Augen ein. (Nach BREWSTER, Das Stereoskop, 1857, p. 49, ereits von BACO beobachtet.) — Am stärksten ist ferner die Verengung der Puille, wenn das leuchtende Object fixirt wird: fällt dagegen das Licht auf mehr eripherische Zonen der Netzhaut, so ist der Einfluss auf die Pupillenverengung n Ganzen um so geringer, je weiter die Zonen von dem Gesichtspunkte der letzhaut entfernt sind — indess ist ein bestimmtes Verhältniss nicht nachgeviesen, nur ist, wenn das Licht nicht auf den Gesichtspunkt fällt, die Abnahme er Pupillenverengung am stärksten. (E. H. WEBER, Annotationes anatomicae et hysiologicae. Fasc. III. De motu iridis. Lipsiae 1851, p. 87.) — Dass weiter die rösse der Fläche auf der Netzhaut, welche von dem Lichte afficirt wird, massebend ist für die Weite der Pupille, ist schon von LAMBERT (Photometria 1760, . 379 u. f.) gezeigt worden.

LAMBERT verfuhr dabei so, dass er durch eine Oeffnung in einem finstern

Zimmer nach dem hellen Himmel blickte und wenn seine Pupille die dieser Licht-intensität entsprechende Weite erlangt haben mochte, rasch das Auge nach einem Spiegel wandte und den Durchmesser der Pupille mittelst eines Cirkels mass. Er fand, dass je mehr er sich von der Oeffnung für das Licht entfernte, seine Pupille um so weiter wurde. Folgendes sind die von Lambert gefundenen Zahlen (p. 381).

Tabelle VII.

Entfernung in Fuss von der Lichtquelle.	Gesichtswinkel der Oeffnung.	Durchmesser der Pupille in Linien.
1	8° 36′	1,13 (= 2,4 Mm.)
2	4° 20′	1,44
3	2° 53′	1,70
4	2° 10′	1,93
5	1° 44′	2,15
6	1° 26′	2,36
7	1° 14′	2,56
8	1° 5′	2,75
9	58′	2,93
10	52′	3,10 (= 6,8 Mm.)

Die Methode der Untersuchung ist nicht tadellos, aber es sind dies die einzigen Messungen.

Die Lichtintensität muss bei der stärkeren Beleuchtung in Folge der Pupillenverengung sehr bedeutend abnehmen: denn wenn die Pupille die Basis des Strahlenkegels ist, dessen Spitze auf die Netzhaut fällt, so hat bei grösster Lichtintensität (grösstem Gesichtswinkel der Oeffnung) der Lichtkegel eine Basis von 4,5 □Mm., bei geringster Intensität eine Basis von 36,3 □Mm. Es wird also mit zunehmender Intensität des Lichtes ein immer grösserer Theil des einfallenden Lichtes abgeblendet, als bei weit bleibender Pupille einfallen würde, bei Lambert etwa $^7/_8$ des einfallenden Lichtes. Es wird daraus das sehr intensive Gefühl von Blendung erklärlich, welches man empfindet, wenn die Pupille durch Atropin unveränderlich gemacht worden ist.

Während die Iris in diesem Falle, nämlich wenn die Axe des Lichtkegels mit der Gesichtslinie zusammenfällt, als lichtabblendender Schirm wirkt, ist die Verengung um so geringer, je grösser der Winkel wird, welchen die Axe des Kegels mit der Gesichtslinie bildet: die Menge des einfallenden Lichtes wird dann aber auch eine immer geringere auch bei gleichbleibender Pupillenweite, denn die Grundfläche des Kegels wird um so kleiner, je schiefer der Kegel wird. Dadurch, dass die Pupille sich weniger verengt, wird vielleicht eine Compensation bewirkt; indess fehlen bis jetzt Messungen über diese Verhältnisse. (cf. Förster, Hemeralopie p. 32, Aubert, Moleschott's Untersuchungen IV. p. 222 und Physiol. der Netzhaut p. 90.) Die Behauptung Dubrunfaut's (Comptes rend. XLI. p. 1008), dass, wenn man eine weisse Fläche auf dunklem Grunde das eine Mal mit einem Auge, das zweite Mal mit beiden Augen ansehe, die Durchmesser der Pupille sich verhielten wie $\sqrt{2}$ zu $\sqrt{1}$, ist als unerwiesen anzusehen (s. Fechner, Ueber die Verhältnisse des binocularen Sehens in Leipziger Abhandlungen VII. 1860, p. 425).

Die Pupille wird enger 2) bei der Accommodation für die Nähe und Con-

rgenz der Augenaxen, wie schon Scheiner (Fundamentum opticum 1619, Lib. I. rs 2) gezeigt hat. Und zwar verengt sich nach Weber (l. c. p. 92) die Pupille cht, wenn ohne Convergenz der Sehaxen für die Nähe accommodirt wird, ver-gt sich dagegen, wenn die Sehaxen ohne Accommodationsänderung conver-ren. Es ist also wesentlich die Convergenz der Sehaxen, an welche die Ver-gung der Pupille gebunden ist; ohne besondere Einübung auf das Gegentheil nd aber immer Convergenz der Sehaxen, Accommodation für die Entfernung, welcher sich die Sehaxen schneiden und Verengung der Pupille mit ein-nder associirt.

Ueber die Verengung der Pupille bei Convergenz der Sehaxen hat Olbers)e mutationibus oculi internis. Diss. inaug. Göttingen 1780, p. 11—12) eine eihe von Messungen angestellt, in ähnlicher Weise wie Lambert, aber mit der erbesserung, dass er seine Pupille in einem Spiegel, welcher in verschiedene ntfernungen gebracht wurde, beobachtete und mit einem dicht vor die Horn-aut gehaltenen Cirkel die Weite der Pupille mass. Er fand folgende Zahlen:

Tabelle VIII.

Entfernung des Objects.	Durchmesser der Pupille in Mm.	
108 Mm.	4,04	+ 0,89
216 -	4,93	+ 0,38
324 -	5,31	+ 0,31
432 -	5,62	+ 0,27
540 -	5,89	+ 0,18
648 -	6,07	+ 0,11
756 -	6,16	

Die Zunahme der Erweiterung ist bei der Entfernung des Objectes von 108 ıf 216 Mm. viel bedeutender, als bei der Entfernung von 648 auf 756 Mm., ıtsprechend der Vergrösserung des Convergenzwinkels der Sehaxen, nicht der unahme der Entfernung. Eine genauere Methode zur Bestimmung der Pupillen-eite hat Stampfer (Wiener Akademie-Berichte VIII. p. 511) angegeben. Am enauesten ist jedenfalls die ophthalmometrische Methode.

Bei keiner anderen Augenbewegung findet eine Mitbewegung der Iris statt, usser bei der Convergenzbewegung und es ist dabei auch gleich, ob die Con-ergenz bei unbewegtem einen Auge, oder bei Seitenwendungen der beiden ugen u. s. w. stattfindet: massgebend für die Verengung der Pupille ist nur er Convergenzwinkel der Sehaxen.

Eine dauernde maximale Erweiterung der Pupille wird ferner herbeigeführt urch verschiedene Gifte, namentlich Atropin und Hyoscyamin; von dem Extracte er Calabarbohne dagegen wird eine andauernde Verengung der Pupille bewirkt. ugleich wird mit der Unbeweglichkeit der Iris auch Accommodationsunfähigkeit ervorgebracht. Ueber die Atropin-Wirkung s. Weber l. c. p. 97, über die alabar-Wirkung s. v. Gräfe im A. f. O. IX, 4. p. 87.

Die Verengung der Pupille wird durch die in der Iris enthaltenen circulären luskelfasern, *Sphincter pupillae*, hervorgebracht — die Erweiterung der Pupille

wird wahrscheinlich durch radiär verlaufende Muskelfasern, den *Dilatator pupillae*, bewirkt (s. I. 3, p. 283 dieses Handbuches), indess stellt GRÜNHAGEN neuerdings (Pflüger's Archiv für Physiologie 1875, X. p. 172), indem er consequent das Vorhandensein radialer Muskelfasern leugnet, eine Bewegung der herausgeschnittenen Iris in diesem Sinne einer Dilatatorwirkung in Abrede und behauptet, dass die Erweiterung der Pupille auf der Zusammenziehung der Ciliarportion der Iris, Elasticität des Irisgewebes und Erschlaffung der Pupillarportion beruhe. Mag man übrigens die Existenz von radiären Muskelfasern in der Iris annehmen, oder nicht, so sind physiologische Thatsachen, welche die Wirkung der Radialfasern nachweisen, bis jetzt nicht bekannt — die grössere Einfachheit der Erklärung kann nicht als Beweis gelten.

Die Bewegungen der Iris stehen unter dem Einflusse des *N. oculomotorius*, *N. trigeminus* und *N. sympathicus;* Reizung der ersteren bewirkt Verengung, Reizung des Sympathicus Erweiterung der Pupille. — Man findet zunächst, dass Reizung der Ciliarnerven und des Ciliarganglions Verengung der Pupille bewirkt (HENSEN und VÖLCKERS l. c. p. 16) und zwar, dass Reizung eines einzelnen Ciliarnerven partielle Contraction des Sphincter der Iris auf der Seite des Nerven bewirkt, so dass die Pupille birnförmig verzogen erscheint.

Weiter hat VALENTIN (De functionibus nervorum cerebralium et nervi sympathici. Bern 1839, p. 18) zuerst beobachtet, dass Durchschneidung des *N. oculomotorius* heftige Verengung der Pupille bei Kaninchen bewirkt — BUDGE (Ueber die Bewegung der Iris 1855, p. 83) und TRAUTVETTER (A. f. O. XII. 1, p. 121) haben an Kaninchen, Hunden und Katzen nachgewiesen, dass Reizung des Oculomotorius immer bedeutende Verengung der Pupille hervorruft, eine Verminderung des Pupillendurchmessers auf mehr als die Hälfte. In v. GRÄFE's Fall von Lähmung aller Augenmuskeln (A. f. O. II. 2, p. 302) war auch die Bewegung der Iris bei Lichtreizungen der Netzhaut vollkommen ausgeschlossen, dagegen die Bewegung der Iris bei Accommodation für die Nähe und Ferne vollkommen erhalten. Es muss daraus geschlossen werden, dass beim Menschen der Oculomotorius nicht der einzige pupillenverengende Nerv sein kann, und wir werden sogleich sehen, dass auch bei Thieren noch ein zweiter Verengungsnerv nachgewiesen ist.

MAGENDIE (Journal de Physiologie 1824, T. IV. p. 176) hat schon beobachtet, dass nach der Durchschneidung des Trigeminus im Schädel die Pupille sehr stark zusammengezogen ist bei Kaninchen, während es nach LONGET (Anatomie et Physiologie du Système nerveux 1842, T. II. p. 100) bei Katzen und Hunden nicht der Fall ist. BUDGE (Bewegung der Iris p. 99) findet die Verengung sehr langsam eintretend nach der Trigeminusdurchschneidung bei Kaninchen und erst nach etwa einer halben Stunde aufhörend. — TRAUTVETTER sah bei Reizung des *Ram. ophthalm.* manchmal eine Verengung, manchmal eine Erweiterung der Pupille eintreten und hält seine Versuche nicht für fehlerfrei (A. f. O. XII. 1, p. 132): bei einer Katze sah er Erweiterung, bei einem Hunde bedeutende Verengung eintreten. Endlich giebt GRÜNHAGEN (Pflüger's Archiv für Physiologie X. 1875, p. 172) an, dass der Einfluss des Trigeminus auf die Pupillenverengung nicht aufgehoben würde durch Atropin, was bei der Verengung durch den Oculomotorius geschähe.

Es sind also für die Iris zweierlei Nerven anzunehmen, welche

ie Pupille zur Verengung bringen, wenn sie gereizt werden, in erster
inie Fasern des Oculomotorius, in zweiter Linie Fasern des Augenastes
om Trigeminus.

Der *N. sympathicus* ist nach allgemeinem Einverständniss der pupillener-
veiternde Nerv. HENSEN und VÖLCKERS (l. c. p. 15) haben aber gefunden, dass
uch nach Abtrennung des *Ganglion ciliare* von seinen Wurzeln die Reizung des
lalssympathicus beim Hunde (es ist nicht gesagt, ob Reizung des isolirten Hals-
ympathicus, oder des ganzen Vagosympathicus) Erweiterung der Pupille *ad
naximum* hervorbringt, dass also dieser Nerv ohne das Ganglion zu durchsetzen,
ur Iris gelangt.

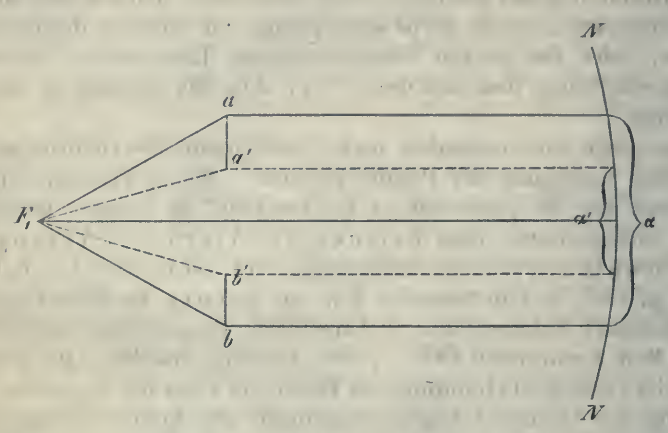
Es lassen sich nun ausserdem noch Centralorgane des Gehirns nachweisen,
leren Reizung Verengung der Pupille bewirkt. Schon FLOURENS (Recherches
xperimentales sur les propriétés et les fonctions du système nerveux 1842,
. 144) hat nachgewiesen, dass Reizung der Vierhügel Verengung der
upillen bewirkt und diese Beobachtungen sind von LONGET (l. c. T. 1. p. 477),
UDGE (l. c. p. 130) und in neuester Zeit von ADAMÜCK (Onderzoekingen gedaan
n het Physiologisch Laboratorium der Utrechtsche Hoogeschool Tweede Reeks III.
. 140 und Med. Centralblatt 1870, p. 66) bestätigt worden. Da einerseits die
erstörung der Vierhügel Erblindung der Thiere zur Folge hat (FLOURENS), anderer-
eits Reizung der Vierhügel Augenbewegungen und Pupillenverengung auslöst,
o müssen wir die Vierhügel als das Organ ansehen, in welchem die
eflexe vom Opticus auf die Irisnerven übergeleitet werden und
n welchem die Erregungen der Nerven zu Convergenzbewegungen
ich associiren mit den Erregungen der Irisnerven.

§ 17. Die Iris als Diaphragma. Zerstreuungskreise. — Die Iris
virkt nun als Blendungshaut oder Diaphragma, indem sie die Randstrahlen des
infallenden Lichtkegels abblendet. Diese Wirkung kommt sehr in Betracht, da
n den dioptrischen Ableitungen immer die Voraussetzung gemacht wird, dass die
infallenden Lichtstrahlen immer nur kleine Winkel mit der Axe des optischen
ystems einschliessen, so dass die Sinus den Winkeln proportional gesetzt werden
önnen. Da die Sinus langsamer zunehmen, als die zugehörigen Bogen, so ent-
pricht einem *n* fachen Sinus ein mehr als *n* facher Bogen, und daraus folgt, dass
lie unter grösseren Winkeln einfallenden Strahlen sich schon vor den unter
leinem Winkel auffallenden Strahlen vereinigen. Je enger die Pupille wird,
ım so genauer werden sich die von einem Punkte ausgehenden Strahlen wieder
n einem Punkte vereinigen, um so schärfer wird dann das Bild eines Objectes
uf der Netzhaut sein. Je kleiner ferner die um die Gesichtslinie gelegenen Ab-
chnitte der Krümmungsflächen werden, um so weniger werden auch etwaige
ehler in der Construction der brechenden Medien sich geltend machen können —
uch in dieser Beziehung ist die Weite der Pupille von namhaftem Einflusse auf
lie Deutlichkeit des Sehens.

Um den Einfluss der Pupillenweite auf die Deutlichkeit des Netzhautbildes
zu erkennen, wollen wir uns vorstellen, ein leuchtender Punkt befände sich im
vorderen Brennpunkte des Auges F_1: die Strahlen desselben sind dann inner-
halb des dioptrischen Systems einander parallel, oder der von dem leuchtenden
Punkte ausgehende Strahlenkegel ist innerhalb des Auges ein Cylinder; die Basis

des Kegels und Cylinders ist aber die Pupillarfläche und die auf der Netzhaut entworfene Kreisfläche muss denselben Durchmesser haben, wie die Pupille. Hat die Pupille den Durchmesser $a\,b$ Figur 30, so muss die Kreisfläche auf der Netzhaut NN den Durchmesser α haben; hat aber die Pupille nur den Durchmesser

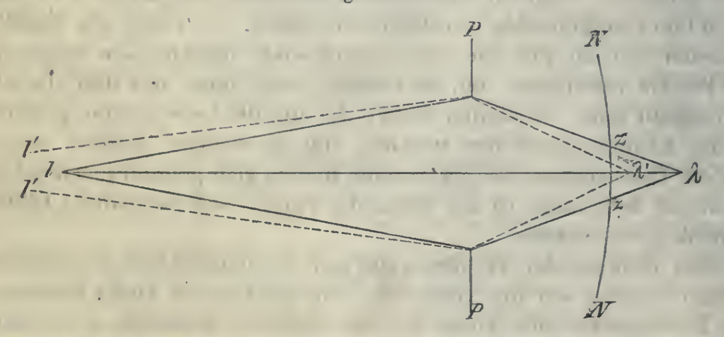
Fig. 30.



$a'\,b'$, so wird die Netzhautkreisfläche auch nur den Durchmesser α' haben können, und denken wir uns den Pupillardurchmesser immer kleiner werden bis zu punktförmiger Grösse, so wird auch die Projection auf die Netzhaut punktförmig werden, mithin, von der Lichtstärke abgesehen, derselbe Effect eintreten, als wenn die Strahlen in einem Bildpunkte auf der Netzhaut vereinigt würden.

Man bezeichnet die Zerstreuungsfläche des Lichtkegels oder Lichtcylinders als »Zerstreuungskreis«, und findet, dass derselbe abhängig ist in Bezug auf seine Grösse von der Pupillenweite. Dasselbe gilt für alle leuchtenden Punkte, deren conjugirter Bildpunkt vor oder hinter der Netzhaut liegt, also für alle Punkte, für welche das Auge nicht accommodirt ist: sie bilden Zerstreuungskreise auf der Netzhaut. Die Zerstreuungskreise sind zugleich das Bild der Pupille.

Fig. 31.



Wenn die Grösse der Zerstreuungskreise einerseits abhängig ist von der Weite der Pupillaröffnung, so muss sie anderseits abhängig sein von der

Höhe, in welcher der Lichtkegel von der Netzhaut geschnitten wird, oder von der Distanz der Spitze des Kegels von der Netzhaut. Ist in Figur 31 PP die Pupille, l ein leuchtender Punkt, λ der ihm conjugirte Punkt hinter der Netzhaut NN gelegen, so wird der Zerstreuungskreis zz grösser sein, als der Zerstreuungskreis für den punktirten Lichtkegel vom leuchtenden Punkte l', dessen conjugirter Punkt in λ' liegt. Dasselbe wird gelten, wenn der conjugirte Punkt vor der Netzhaut liegt und die Strahlen nachher wieder divergiren.

Die Grösse der Zerstreuungskreise auf der Netzhaut lässt sich nun berechnen aus der Weite der Pupille, der Entfernung der Netzhaut von derselben, dem hinteren Brennpunkte des Auges und der Entfernung des leuchtenden Punktes von dem vorderen Hauptpunkte des Auges.

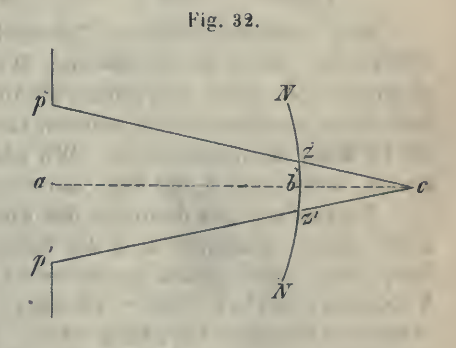
Ist in Figur 32 $pp'c$ der Normalschnitt (senkrecht auf Axe und Basis) eines Strahlenkegels und NN die Netzhaut, welche den Kegel parallel der Basis in z und z' schneidet, so ist

$$pp' : ac = zz' : bc \text{ oder}$$

$$zz' = \frac{pp' \cdot bc}{ac}.$$

zz' ist aber der Durchmesser des Zerstreuungskreises auf der Netzhaut.

Fig. 32.



Für den Fall, dass bei unendlich entferntem leuchtenden Punkte der hintere Hauptbrennpunkt des Auges in die Ebene der Netzhaut fällt (also für ein emmetropisches, accommodationsloses Auge), hat Listing (Art. Dioptrik in Handwörterbuch der Physiologie IV. p. 499) die Grösse der Zerstreuungskreise für sein schematisches Auge (s. § 11) berechnet, indem er die Pupillenweite = 4 Mm. Durchmesser setzt, wenn der leuchtende Punkt von unendlicher Entfernung sich bis auf 88 Mm. Entfernung dem vorderen Hauptbrennpunkte des Auges nähert. Die Lage der Spitze des Strahlenkegels hinter der Netzhaut ergiebt sich aus der Formel 5) (§ 2) für die conjugirten Vereinigungsweiten und Brennweiten: bezeichnet l_1 die Entfernung des leuchtenden Punktes von dem vorderen Hauptbrennpunkte, l_2 die Entfernung des Bildpunktes von dem hinteren Hauptbrennpunkte, F_1 und F_2 die vordere und hintere Hauptbrennweite, so haben wir

$$l_2 = \frac{F_1\, F_2}{l_1}.$$

Das Product $F_1\, F_2 = 12{,}8326 \cdot 22{,}647$ ist von Listing in runder Zahl = 300 □ Mm. gesetzt.

In der folgenden Tabelle IX bedeutet also l_1 die Entfernung des leuchtenden Punktes von dem vorderen Brennpunkte nach vorn, l_2 die des Bildpunktes von der Netzhaut nach hinten, z den Durchmesser der Zerstreuungskreise. Pupillenweite = 4 Mm. Durchmesser.

Tabelle IX.

l_1	l_2	z
∞	0	0
65 Meter	0,005 Mm.	0,0011 Mm.
25 -	0,012 -	0,0027 -
12 -	0,025 -	0,0056 -
6 -	0,050 -	0,0112 -
3 -	0,100 -	0,0222 -
1,5 -	0,20 -	0,0443 -
0,75 -	0,40 -	0,0825 -
0,375 -	0,80 -	0,1616 -
0,118 -	1,60 -	0,3122 -
0,094 -	3,20 -	0,5768 -
0,088 -	3,42 -	0,6484 -

Zum Verständniss dieser Tabelle bemerken wir noch, dass die Grösse vo 0,0027 Mm. etwa die Grenze der Wahrnehmbarkeit von Seiten der Netzhaut-elemente bezeichnet, dass mithin ein Unterschied in der Deutlichkeit eines Objecte noch nicht wahrgenommen werden kann, wenn das Auge für ∞ oder auf meh als 25 Meter accommodirt ist. Wir können allgemein sagen, dass Zerstreuungs-kreise, welche um 0,002 Mm. von einander differiren, gleich gross erscheinen.

Denken wir uns demnach das Auge auf 375 Mm. accommodirt, so würde e unter dieser Annahme nach der Rechnung auch zugleich für 379,4 Mm. und fü 370,3 Mm. völlig genau accommodirt sein: diese Differenz bezeichnet man al Accommodationslinie (Czermak, Physiologische Studien p. 1. [Aus de Wiener Akademie-Berichten 1854, XII. p. 322]). Die Accommodationslini würde also von ∞ bis 30 Meter, von 379,4 Mm. bis 370,3 Mm., von 88,27 Mm bis 87,73 Mm. reichen und abnehmen mit der absoluten Entfernung des Objecte vom Auge.

Da die Grösse der Zerstreuungskreise proportional der Pupillenweite zu- un abnimmt, so muss die Grösse der Accommodationslinie sich umgekehrt verhalten bei einer Pupillenweite von 2 Mm. statt 4 Mm. würden also die Zerstreuungs-kreise nur halb so gross, die Accommodationslinie doppelt so lang sein.

Da die Pupille sich nicht sehr viel weiter als auf 2 Mm. Durchmesser verkleinert, s werden die Zerstreuungskreise von sehr nahen Objecten bei Accommodation für eine grösser Entfernung immer sehr merklich werden: man kann aber statt der Pupille einen Schirm mi einem sehr feinen Loch, also ein punktförmiges Diaphragma dicht vor das Auge bringen, u Objecte in grösster Nähe, für welche man nicht mehr accommodiren kann, scharf und ohn Zerstreuungskreise zu sehen — und umgekehrt ferne Objecte deutlich zu sehen, während ma für grösste Nähe accommodirt ist. Man braucht z. B. nur in ein Kartenblatt mit einer seh feinen Nadel ein Loch zu stechen (von etwa 1/4 Mm. Durchmesser), um bei Accommodation fü die Ferne feinste Schrift in 50 Mm. Entfernung lesen zu können — nur sind die Objecte dan sehr lichtschwach. Wegen der grossen Nähe erscheinen dann die Buchstaben oder sonstige Objecte sehr gross, wie sich aus Formel 7) (§ 2) ergiebt. Ein punktförmiges Diaphragma kan daher als Lupe dienen und ist wegen seiner Billigkeit ein ziemlich verbreiteter Handelsartike Ueber die Wirkung punktförmiger Diaphragmen s. Czermak, Physiologische Studien, p. 1 (aus den Wiener Akadem.-Berichten 1854, XII. p. 334) — über die zunehmende Vergrösserun des Objectes bei Entfernung des punktförmigen Diaphragmas vom Hornhautscheitel s. Helm-holtz, Physiol. Optik p. 96.

Von dem Auftreten und von der verschiedenen Grösse der Zerstreuungskreise kann man sich sehr leicht unterrichten, wenn man einen hellen Punkt auf dunklem Grunde oder eine helle oder dunkle Linie auf entgegengesetztem Grunde vor das Auge bringt und für eine grössere oder geringere Entfernung absichtlich accommodirt. Das Object erscheint nicht scharf, sondern je nach der Differenz der Accommodationsweite von der Entfernung des Objectes vergrössert und verschwommen. Wir nehmen daher stillschweigend an, dass wir für ein Object richtig accommodirt sind, wenn es uns am schärfsten und deutlichsten erscheint. Für die Genauigkeit, mit welcher wir den richtigen Accommodationszustand unseres Auges beurtheilen, ist massgebend die Beschaffenheit des Objectes und die Güte und Correctheit unseres dioptrischen Apparates — abgesehen von der Schärfe unseres Empfindungsorganes und unseres Urtheils. Diese Umstände kommen namentlich in Betracht, wenn es sich um die Feststellung des genauesten Accommodationsstandes pathologischer Augen handelt, und dieselben haben zur Construction verschiedener Optometer geführt. (S. III. 1, p. 1—22 dieses Handbuches unter Eidoptometrie.)

Die Zerstreuungskreise kommen ferner in Betracht beim Visiren: Visiren heisst, verschieden weit entfernte Punkte an einer Stelle des Gesichtsfeldes zur Deckung bringen. Da das Auge nur für eine Entfernung (in einem gegebenen Momente) accommodirt sein kann, so wird auch nur der eine Punkt ein deutliches Bild entwerfen können, die näheren oder entfernteren Punkte müssen in Zerstreuungskreisen erscheinen. Befinden sich zwei Punkte in verschiedener, aber sehr grosser Entfernung, also über 25 Meter vom Auge entfernt, so ist wegen der Unmerklichkeit des Zerstreuungskreises eine absolut genaue Deckung möglich; befindet sich der eine Punkt aber nahe vor dem Auge, z. B. in 0,5 Meter, der andere in 30 Meter Entfernung, so wird von ersterem unter den Voraussetzungen der Tabelle ein Zerstreuungskreis von 0,12 Mm. Durchmesser gebildet, und man verfährt dann so, dass man den Mittelpunkt des Zerstreuungskreises mit dem Bilde des entfernteren Punktes zur Deckung bringt. Die durch diese sich deckenden Punkte gezogene Linie heisst »Visirlinie«. Da der Zerstreuungskreis das Bild der Pupille ist, so muss die Visirlinie mit dem Strahle zusammenfallen, welcher nach dem Mittelpunkte der Pupille, oder, genau genommen, nach dem Mittelpunkte des Hornhautbildes der Pupille geht. Die Visirlinien sind also zu unterscheiden von der Gesichtslinie, welche von der Netzhautgrube durch die Knotenpunkte geht. Denken wir uns den Augapfel um seinen Drehpunkt nach oben oder unten, rechts oder links gedreht, so wird beim Visiren in diesen Stellungen der Kreuzungspunkt der Visirlinien in den Mittelpunkt der Pupille oder nach der Berechnung von Helmholtz (Physiol. Optik p. 93, 99 und 584) etwa 0,5 Mm. vor den Mittelpunkt der Pupille fallen. Dieser Punkt, der Kreuzungspunkt aller Visirlinien, liegt also etwa 3 Mm. vor dem hinteren Knotenpunkte, dem Kreuzungspunkte der Richtungslinien des Sehens.

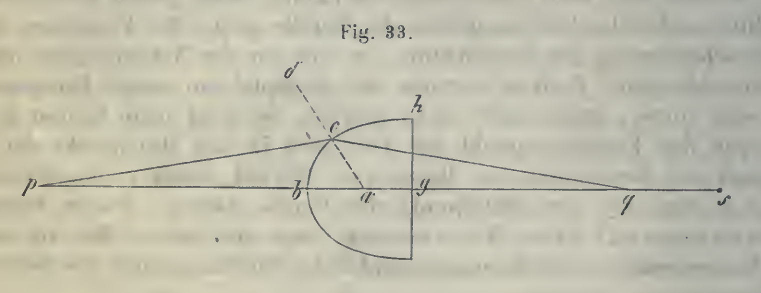
§ 18. Monochromatische Abweichungen. Astigmatismus. — Aus den Untersuchungen über die Krümmungsverhältnisse der brechenden Medien des Auges hat sich ergeben, dass die Hornhaut nicht gleiche Krümmungen in den verschiedenen Meridianen hat und dass der Scheitelpunkt derselben nicht von der Gesichtslinie geschnitten wird, mithin die brechenden Medien des Auges nicht centrirt sind. Für die Brechung der Lichtstrahlen ergiebt sich daraus, dass eine Vereinigung der von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Lichtstrahlen nach der Brechung nicht wieder in einem einzigen Punkte stattfinden kann, dass

vielmehr das Bild eines leuchtenden Punktes, welches auf der Netzhaut entworfen wird, immer eine Fläche sein muss, deren Form und Grösse abhängig ist von der Grösse der Abweichung der Krümmungsradien verschiedener Meridiane, von dem Winkel, welchen die Meridiane maximaler und minimaler Krümmung mit einander bilden, und von dem Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Hornhautaxe. — Zu der Asymmetrie der brechenden Flächen und der mangelhaften Centrirung der brechenden Medien kommt endlich noch eine unvollkommene Durchsichtigkeit derselben, in Folge deren eine Zerstreuung des Lichtes nach allen Dimensionen stattfindet. Gegenüber diesen oft erheblichen Unvollkommenheiten des Auges kann die aus der Form der Krümmungen resultirende sphärische Aberration des Auges oder richtiger, die Abweichung wegen der Gestalt der brechenden Flächen in Bezug auf monochromatisches Licht ganz unberücksichtigt gelassen werden.

Wir haben in § 4 die Messungen, welche sich auf die Asymmetrie der Hornhautkrümmung beziehen, angeführt. Diese Asymmetrie ist, wie namentlich Donders in seinen Arbeiten über den Astigmatismus (A. f. O. VI. 1, p. 62, — VI. 2, p. 210, — Astigmatismus und cylindrische Gläser, Berlin 1862, — Anomalien der Refraction und Accommodation, Wien 1866, p. 379) festgestellt hat, individuell sehr verschieden, aber auch im normalen Auge regelmässig vorhanden.

Denken wir uns der Einfachheit wegen ein aphakisches Auge, so muss, wie Sturm (Poggendorff's Annalen 1845, Bd. 65, p. 116, — cf. Fick, Medicinische Physik 1856, p. 326) zuerst entwickelt hat, ein homocentrisches Strahlenbündel, welches auf die asymmetrische Hornhautoberfläche auffällt, nach der Brechung heterocentrisch werden, indem die stärkere Krümmung in einem Meridiane die Strahlen früher zur Vereinigung bringt, als die schwächere Krümmung eines anderen Meridians, wie bereits in § 6 an Figur 16 erläutert worden ist. Stellt nach der Entwickelung von Helmholtz (Physiol. Optik p. 142) Figur 33 einen Haupt-

Fig. 33.



schnitt durch das Ellipsoid der Hornhaut mit der grossen Axe bg, mit der kleinen Axe hg, p den leuchtenden Punkt vor, so wird ein ebenfalls im Hauptschnitt auffallender Strahl pc die grosse Axe in q schneiden, indem

$$\sin acq = n \cdot \sin pcd$$

sein muss. Die nahezu lothrecht bei b auffallenden Strahlen haben also einen gemeinschaftlichen Vereinigungspunkt, dessen Entfernung abhängt von dem Krümmungsradius der krummen Linie bch bei b. Liegt p ∞ entfernt, so ist die hintere Brennweite für den gegebenen Hauptschnitt

$$F_2 = \frac{n \cdot r'}{n - 1}$$

Denken wir uns senkrecht gegen diesen in der Ebene des Papiers liegenden Hauptschnitt einen Hauptschnitt durch bq und die dritte Axe des Ellipsoids gelegt mit einem Krümmungsradius von dem Werthe r'', so ist entsprechend die hintere Brennweite desselben

$$F_2 = \frac{n \cdot r''}{n - 1}$$

so dass die hier auffallenden Strahlen in s zur Vereinigung kommen; q und s sind die Grenzen der Brennstrecke (Sturm), entsprechend der Brennstrecke $f_h f_v$ in Figur 16 (§ 6). Da der Uebergang von dem stärkstgekrümmten Meridiane zu dem wenigstgekrümmten ein ganz allmäliger an der Krümmungsoberfläche ist, so wird ein ganz allmäliges Herunterrücken der Brennweiten der übrigen Meridiane und ein eben so allmäliges Herunterrücken der Brennweiten der übrigen Meridiane und ein eben so allmäliges Zu- und Abnehmen der beiden Zerstreuungsfiguren stattfinden. Denken wir uns die Querschnitte der Brennstrecke q bis s oder Figur 16 f_v bis f_h, d. h. die Projection derselben auf die Netzhaut, so würden wir etwa folgende Formen für dieselben erhalten: Figur 34 in A der Brennpunkt des verticalen Krümmungsschnittes mit unvereinigten horizontalen Schnitten, in B Auseinandertreten der verticalen, Annäherung der horizontalen Schnittlinie, in C gleich weite Entfernung des horizontalen und verticalen Schnittes, daher kreisförmige Zerstreuungsfläche, in D das Umgekehrte wie in B und in E umgekehrt wie in A (s. Donders, Anomalien p. 382). Ferner würde ein Zerstreuungskreis bei zu grosser Accommodation für die Nähe die Form B haben, nur grösser sein, ein Zerstreuungskreis bei zu grosser Accommodation für die Ferne eine ähnliche Form wie D haben.

Fig. 34.

Mit diesen Formen der Zerstreuungsbilder stimmen nun in der That die Erscheinungen überein, welche wir bei der Beobachtung von Objecten wahrnehmen. Da die meisten Augen die bedeutendsten Krümmungsdifferenzen ungefähr zwischen dem horizontalen und verticalen Meridiane zeigen, so beobachtet man Folgendes:

1) Ein heller Lichtpunkt (Bild einer Kerzenflamme in einem Convexspiegel, Th. Young), oder kleine runde, dem Licht zugekehrte Oeffnung in einem Schirm, oder Spiegelbild derselben in einem Convexspiegel (Donders) bildet, wenn das Auge auf einen vor oder hinter ihm befindlichen Punkt accommodirt ist, nicht einen runden, sondern einen elliptischen Zerstreuungskreis. War bei Accommodation des Auges vor dem hellen Punkte die grosse Axe der Ellipse vertical, so ist sie bei Accommodation hinter dem hellen Punkt horizontal, entsprechend B und D in Figur 34. — Statt zu accommodiren, kann man das

emmetropische Auge durch Vorhalten eines schwachen Convexglases (z. B. $^1/_{40}$) myopisch machen und dann das Convexglas vertauschen mit einem Concavglase (z. B. — $^1/_{20}$). Bei raschem, wiederholtem Wechsel mit beiden Gläsern erscheinen (in Folge des Auftretens eines Nachbildes) die Zerstreuungsbildchen in Form eines Kreuzes (Donders, Astigmatismus p. 15).

2) Zwei feine Drähte, der eine vertical, der andere horizontal, die sich in einer Ebene kreuzen, werden nicht gleichzeitig scharf gesehen; sieht man den horizontalen scharf, so muss sich der verticale, um eben so deutlich zu erscheinen, vom Auge entfernen — accommodirt man für den verticalen, so muss man den horizontalen, um ihn eben so scharf zu sehen, dem Auge nähern.

3) Eine Anzahl dicht neben einander befindlicher Parallelstreifen in verticaler Richtung (Burkhardt, Internationale Sehproben, Cassel 1871, Taf. V) erscheint scharf begrenzt, während in gleicher Ebene liegende horizontale Parallelstreifen undeutlich begrenzt, mit Zerstreuungskreisen erscheinen. Können bei gewisser Entfernung die verticalen Streifen eben noch unterschieden werden, so ist dies bei den horizontalen Streifen nicht möglich (Donders).

4) Blickt man durch einen 0,5 Mm. bis 1 Mm. breiten verticalen Spalt auf einen im Nahepunkte befindlichen hellen Punkt, so erscheint derselbe scharf begrenzt; vertauscht man den verticalen Spalt plötzlich mit einem horizontalen, so erscheint der Punkt verwaschen; er erscheint wieder scharf, wenn er etwas vom Auge entfernt wird. Der Nahepunkt liegt mithin für den verticalen Meridian dem Auge näher, als für den horizontalen Meridian (Knapp, A. f. O. VIII. 2, p. 193).

5) Bringt man vor die Pupille zwei kleine, 2 Mm. von einander entfernte Löcher in einem Schirm (wie im Scheiner'schen Versuche, § 13 Figur 26) und spannt in der Verlängerung der Sehaxe einen Faden aus, so erscheint derselbe in einer gewissen Entfernung einfach, wenn die beiden Löcher vertical stehen; dreht man bei unveränderter Accommodation den Schirm so, dass die beiden Löcher horizontal stehen, so liegt die einfach gesehene Stelle des Fadens ferner (Knapp, VIII. 2, p. 195). Die Brennweite in der Verticalebene des Auges ist also kürzer, als in der Horizontalebene. — Weitere Versuche s. bei Donders, Anomalien p. 380 u. f.

Wenn einerseits verschiedene Krümmungsradien für den horizontalen und verticalen Meridian der Hornhaut gefunden worden sind, anderseits Erscheinungen beim Sehen zur Beobachtung kommen, welche sich von solchen Krümmungsdifferenzen der Hornhautoberfläche ableiten lassen, so wird der Zusammenhang beider Beobachtungen ein sehr wahrscheinlicher sein. Ein Beweis für die Abhängigkeit der Sehstörungen von der Hornhautasymmetrie kann aber nur durch quantitative Bestimmungen erbracht werden, und es entstehen die Fragen, erstens: ist nur die Hornhautasymmetrie oder ist auch zugleich Linsenasymmetrie Ursache des Astigmatismus? zweitens: stimmt die an der Hornhaut beobachtete Asymmetrie in Bezug auf Richtung und Grösse mit den beobachteten Sehstörungen?

Diese Fragen sind von Donders (Anomalien p. 393. — Astigmatismus p. 24) und Knapp (A. f. O. VIII. 2, p. 205) einer eingehenden Untersuchung sowohl für normale, als für pathologisch-astigmatische Augen unterworfen worden nach folgendem Verfahren: zuerst wird an einem feinen Lichtpunkte und mittelst des Fadenoptometers (2) die Richtung und Grösse des Astigmatismus bestimmt und

z. B. gefunden, dass ein Lichtpunkt als verticale Linie erscheint, dass horizontale Linien noch bei 118 Mm Entfernung vom Knotenpunkte, verticale nur bei 137 Mm. Entfernung deutlich gesehen werden. Setzt man die beiden Abstände als conjugirte Vereinigungsweiten einer Convexlinse und berechnet daraus ihre Brennweite, so drückt ihr reciproker (umgekehrter) Werth ihre Brechkraft und die Grösse der Asymmetrie des gesammten Auges aus. Es würde also sein die Asymmetrie

$$As = \frac{1}{A} = \frac{1}{118\ \text{Mm.}} - \frac{1}{137\ \text{Mm.}} = \frac{1}{851\ \text{Mm.}}.$$

Weiter wird nun die Asymmetrie der Hornhautoberfläche mittelst des Ophthalmometers bestimmt und daraus die hinteren Brennweiten der beiden Meridianschnitte, indem

$F_{2h} = \frac{n \cdot r_h}{n-1}$ und $F_{2v} = \frac{n \cdot r_v}{n-1}$ woraus sich die Länge der Brennstrecke $B = F_{2h} - F_{2v}$ ergiebt.

Um nun für die Grösse der Hornhautasymmetrie einen numerischen Ausdruck zu finden, welcher demjenigen der Asymmetrie des ganzen Auges vergleichbar ist, berechnet Knapp zunächst die vordere Brennweite des verticalen Meridians

$$F_{1v} = \frac{r_v}{n-1} = \frac{F_{2v}}{n}.$$

Betrachtet man nun die Hornhaut als die sphärische Trennungsfläche eines einfachen brechenden Systems mit dem Krümmungsradius r_v, und nimmt F_{2h} als eine hintere Vereinigungsweite an, so findet sich die dazu gehörige vordere Vereinigungsweite f_1 nach der Formel 5) (§ 2)

$$f_1 = \frac{F_{2h} \cdot F_{1v}}{F_{2h} - F_{2v}}$$

Dann ist $\frac{1}{f_1}$ der numerische Ausdruck für die Grösse der Meridianasymmetrie der Hornhaut. Befände sich nämlich die Netzhaut im Brennpunkte des horizontalen Meridians, so würden sich in derselben vereinigen zu einem Bildpunkte sowohl horizontale parallele Strahlen, als auch verticale Strahlen, welche von einem um f_1 entfernten leuchtenden Punkte ausgehen. Die Grösse der Asymmetrie der Hornhaut, welche wir mit As_c bezeichnen, ist also gleich

$$\frac{1}{f_1} - \frac{1}{\infty} = As_c$$

Die Asymmetrie des ganzen Auges As_0 ist nun die Summe der Asymmetrie der Hornhaut As_c und der Asymmetrie der Linse As_l

$$As_0 = As_c + As_l$$

woraus die Asymmetrie der Linse sich ergiebt

$$As_l = As_0 - As_c$$

Knapp hat an seinem eigenen Auge gefunden

$$As_c = 1021{,}5\ \text{Mm. und } As_0 = 851\ \text{Mm.}$$

Es findet sich also

$$As_l = \frac{1}{851} - \frac{1}{1021{,}5} = \frac{1}{5098{,}5\ \text{Mm.}}$$

In diesem Falle ist also, weil As_0 grösser als As_c, die Ungleichheit der Meridiankrümmung der Hornhaut gleichsinnig mit derjenigen der Krystalllinse; es

kann aber auch der umgekehrte Fall stattfinden, dass die Asymmetrie der Hornhaut von der der Linse compensirt wird, und As_0 kleiner gefunden wird als As_c. — Knapp hat in 16 Fällen 11 Mal gleichsinnige Asymmetrie der Hornhaut und Linse, 5 Mal ungleichsinnige Asymmetrie gefunden, — Donders in 15 Fällen nur 2 Mal ungleichsinnige Asymmetrie: die Meridianasymmetrie der Hornhaut und die des Linsensystems summiren sich also häufiger, als sie sich compensiren.

Es geht ferner aus Donders' Untersuchungen (Anomalien p. 393) hervor, dass die Asymmetrie keineswegs gerade im verticalen und horizontalen Meridian ihr Maximum erreicht, sondern meistens in dazwischen gelegenen Meridianen. Ueber die Ermittelung dieser Meridiane s. Donders a. a. O. p. 404.

Wir verweisen ferner auf Kaiser, Theorie des Astigmatismus im A. f. O. XI. 3, p. 186.

Was nun weiter die durch den Astigmatismus hervorgebrachten Störungen beim Sehen betrifft, so giebt schon Thomas Young (Philos. Transactions 1793, Vol. 83, p. 169 und Miscellaneous Works of the late Th. Young edited by Peacock London 1855, I. p. 26) an, dass er eine Asymmetrie seiner Augen (und zwar As_0) von $\frac{1}{621}$ Mm. gefunden, aber nie beobachtet habe, dass sein Gesicht irgendwie dem anderer Leute nachgestanden habe, und Knapp bemerkt, dass keiner seiner 16 Fälle, für die der grösste Werth der Meridianasymmetrie $\frac{1}{523}$ Mm., der kleinste Werth $\frac{1}{2360}$ Mm. betrug, Sehschwäche in irgend einer Hinsicht gezeigt hätte. Der Astigmatismus kann aber auch so hochgradig sein, dass dadurch sehr bedeutende Störungen beim gewöhnlichen Sehen hervorgerufen werden und eine Correctur durch cylindrische Brillen erforderlich wird, worüber namentlich Donders' Anomalien nachzusehen sind.

Bezüglich der Genauigkeit der Bestimmung für die Asymmetrie des Gesammtauges verweisen wir auf Donders und Knapp (A. f. O. VIII. 2, p. 210), welcher letztere auch auf Veränderungen des Astigmatismus hinweist, welche durch Accommodationsbewegungen hervorgebracht werden können, Untersuchungen, welche Kaiser (A. f. O. XI. 3, p. 186) weiter geführt hat.

Aus den bisherigen Untersuchungen geht hervor, dass wohl alle Augen astigmatisch sind und völlig symmetrische Augen eine seltene Ausnahme sein dürften.

Der Vereinigung des von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlenkegels in genau einen Punkt steht ferner entgegen, dass die Augenmedien nicht vollkommen centrirt sind; wir haben in § 4 gesehen, dass die Gesichtslinie nicht zusammenfällt mit der Hornhautaxe, sondern dass die Gesichtslinie medianwärts von der Hornhautaxe und ausserdem bald nach oben, bald nach unten von derselben abweicht. Da wir indess nach § 7 und § 9 die Abweichung der Linsenaxe von der Hornhautaxe nicht genau genug bestimmen können, um Berechnungen über die Interferenzen der beiden von ihnen ausgehenden Lichtkegel zu machen, so lässt sich bis jetzt die Grösse der aus der mangelhaften Centrirung hervorgehenden Störung nicht bestimmen.

Ebenso wenig lässt sich endlich die Grösse der Störung für die genaue Vereinigung der Lichtstrahlen in einen Punkt bestimmen, welche hervorgebracht

wird durch kleine Unregelmässigkeiten auf der Oberfläche der Hornhaut und
durch undurchsichtige Partikelchen innerhalb der brechenden Medien. Die Horn-
hautoberfläche ist nicht vollkommen glatt, vielmehr besitzt dieselbe kleine,
wechselnde Erhöhungen, welche von abgestossenen Epithelien, Fetttröpfchen,
Schleimklümpchen und dergleichen herrühren und auch im normalen Auge stets
vorhanden sind. Auf eine grössere Anhäufung derartiger Ungleichmässigkeiten
führt man die *Polyopia monocularis*, den normalen unregelmässigen Astigmatismus
nach Donders, zurück. Fick (Medicinische Physik p. 332) hat eine Construction
der Strahlenablenkung gegeben, wie sie durch eine kleine convexe Hervorragung
auf der Hornhaut erzeugt werden würde: bei der Unregelmässigkeit der hier in
Betracht kommenden Objecte wird die Veränderung der Strahlenbrechung eine
sehr complicirte sein und von dem Wechsel der Objecte und ihrer Lage auf der
Hornhaut abhängig sein. — Beim Sehen auf eine gleichmässig helle Fläche, z. B.
den hellgrauen oder blauen Himmel, machen sich die Unregelmässigkeiten auf
der Hornhaut bemerkbar, indem sie die Gleichmässigkeit der Beleuchtung stören
und einzelne Stellen verdunkeln — ihre Bewegungen sind vom Lidschlage und
den Augenbewegungen abhängig und sie bilden einen Theil der sogenannten
fliegenden Mücken (*mouches volantes*), welche aber, wie wir in § 20 sehen werden,
auch noch von entoptischen Objecten herrühren. Zweitens sind also in den
Augenmedien selbst undurchsichtige oder durchsichtige, aber mit einem anderen
Brechungsexponenten versehene Partikelchen, welche den regelmässigen Gang
der Lichtstrahlen verändern, indem sie theils eine Zurückwerfung, theils eine
Zerstreuung, theils eine Ablenkung bewirken. Dass die brechenden Medien nicht
vollkommen durchsichtig sind, tritt sehr frappant hervor bei der Untersuchung
mit seitlicher Beleuchtung (cf. Snellen und Landolt dieses Handbuch III. 1,
p. 165): die Pupille erscheint dann grau oder bläulichgrau, und diese Undurch-
sichtigkeit nimmt mit dem Lebensalter zu (Donders, Anomalien p. 170). Sind
kleine, undurchsichtige Körnchen in den durchsichtigen Medien vorhanden, so
wird dadurch eine gleichmässige Zerstreuung des einfallenden Lichtes nach allen
Dimensionen, ähnlich wie bei einer mit Wasserdampf oder Nebel oder Staub er-
füllten Luft stattfinden müssen. Dadurch wird weiter eine Erhellung der Netz-
haut in ihrer ganzen Ausdehnung bewirkt werden, indem jedes einzelne Körnchen
gewissermassen selbst Lichtquelle wird und nach allen Seiten hin Licht aus-
sendet. Fällt also von einem leuchtenden Punkte, z. B. einem Stern, Licht in
das Auge, so wird nur ein Theil des einfallenden Lichtes normal gebrochen, ein
anderer Theil aber im Auge diffus zerstreut werden, und keine Stelle der Netz-
haut absolut lichtfrei oder dunkel sein können. Der Grund des gestirnten Himmels
z. B. wird daher niemals ganz dunkel erscheinen können auch bei vollkommenster
Durchsichtigkeit der Atmosphäre (cf. Helmholtz, Physiol. Optik p. 142 und Poggen-
dorff's Annalen 1852, Bd. 86, p. 509).

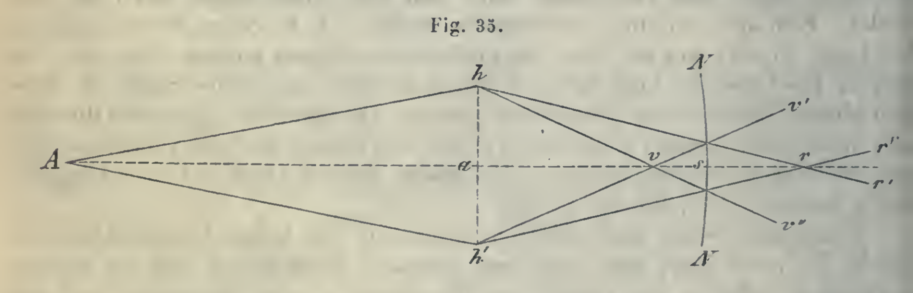
Ausserdem treten aber Zerstreuungsfiguren von hellen Lichtpunkten auf,
welche für jedes Auge eine besondere constante Form haben und von abnorm
brechenden Partikeln der Linse, des Glaskörpers u. s. w. herrühren (Donders,
Anomalien p. 169 und p. 457). Dahin gehören folgende Erscheinungen: 1) bei
möglichst guter Accommodation erscheinen helle Fixsterne oder überhaupt punkt-
förmige Objecte auf dunklem Grunde, z. B. das Reflexbild eines Lichtes auf einer
Thermometerkugel oder ein Körnchen Bleiweiss (Abschabsel einer Visitenkarte)

auf schwarzem Sammet (DONDERS) mit eigenthümlichen, unregelmässigen Strahlen versehen. Diese Strahlen scheinen bei allen Augen vorzukommen, sind aber verschieden an Länge und Richtung bei verschiedenen Individuen und auch verschieden für das rechte und linke Auge derselben Person; 2) bei unrichtiger Accommodation erscheinen die Zerstreuungsbilder heller Punkte nicht als kreisförmige Flächen, sondern als sternförmige, zackige Figuren (HELMHOLTZ, Physiol. Optik p. 138 Figur 65), entsprechend dem entoptischen Bilde der Linse (DONDERS, Figur 104 p. 169 der Anomalien etc.). Für den Zusammenhang der sternförmigen Zerstreuungsbilder mit dem entoptischen Bilde der Linse macht DONDERS (p. 459) geltend, dass bei Bewegungen des Auges keine parallaktischen Verschiebungen des Bildes eintreten, dasselbe also von Objecten in der Nähe der Pupillarebene herrühren muss, und zweitens, dass es bei Mangel der Krystalllinse (Aphakie) fehlt.

Wenn nun durch die Fehler der brechenden Medien und ihrer Krümmungsflächen die Bilder von Punkten nicht punktförmig auf der Netzhaut werden, sondern Zerstreuungsfiguren entstehen, so muss auch die linienförmige Grenze heller und dunkler Flächen nicht als scharfe Linie, sondern als verwaschene Grenzzone erscheinen, in welcher Hell und Dunkel gemischt sind zu einer Nüance, welche heller als die dunkle Fläche und dunkler als die helle Fläche erscheint. Darauf beruhen zum Theil die Erscheinungen der Irradiation, worunter man gewöhnlich die Vergrösserung heller Flächen auf Kosten der dunkleren Umgebung versteht. Wir werden auf die Irradiation erst später näher eingehen und ihre Einflüsse auf die Wahrnehmung von Objecten besprechen (§ 53).

§ 19. Chromasie des Auges. Da das weisse Licht aus Lichtwellen von verschiedener Schwingungsdauer und daher auch verschiedener Brechbarkeit zusammengesetzt ist, so kann durch die Medien des Auges weisses, von einem Punkte ausgehendes Licht nicht in einem gemeinschaftlichen Vereinigungspunkt zusammentreffen, vielmehr werden die brechbarsten, die violetten Strahlen ihren Vereinigungspunkt vor den wenigst brechbaren, den rothen Strahlen haben müssen. Ist in Figur 35 A ein weisser leuchtender Punkt, hh' die Hauptebene, so werden die rothen Strahlen ihren Vereinigungspunkt in r, die violetten Strahlen

Fig. 35.



ihren Vereinigungspunkt in v haben, während die Strahlen mittlerer Brechbarkeit, also die grünen Strahlen in s zusammentreffen. Befindet sich in NN die Netzhaut, so muss ein Zerstreuungskreis mit gemischtem, also weissem Lichte erscheinen; wäre die Netzhaut durch v gelegt, so würde in der Mitte des Zer-

streuungskreises Violett, am Rande Roth erscheinen, umgekehrt, wenn sie sich in · befände. Denken wir uns nun die Netzhaut wieder durch s gelegt, und den unteren Theil der Kegelbasis (die untere Hälfte der Pupille) ah' verdeckt, so fallen die violetten Strahlen zwischen ah' und av sowie deren Verlängerungen vv' und rr fort und die rothen zwischen $h'r$ und ar. Es verschwindet also oberhalb der Axe das violette auf NN fallende Licht, unterhalb das rothe Licht, und demgemäss wird ein unten violetter, oben rother Zerstreuungskreis auf der Netzhaut gebildet werden. Aus den Beobachtungen von FRAUENHOFER über die Brechungsverhältnisse verschiedener Lichtwellen in Wasser lässt sich die Differenz der Brennweiten des Auges für rothes und violettes Licht berechnen: den Brechungsindex für rothes Licht in Wasser n^r fand FRAUENHOFER $= 1{,}331705$, für violettes Licht $n^v = 1{,}341285$. Setzen wir den Krümmungsradius des reducirten Auges von LISTING $= 5{,}1248$ Mm., so haben wir für die Hauptbrennweite des rothen Lichtes f_r (Formel 4^a § 2)

$$f_r = \frac{n_r\, r}{n_r - 1} = 20{,}574$$

für die des violetten Lichtes

$$f_v = \frac{n_v\, r}{n_v - 1} = 20{,}140$$

Die Distanz der beiden Brennpunkte für rothes und für violettes Licht beträgt darnach 0,434 Mm. A. MATTHIESSEN (Comptes rendues 1847, XXIV. p. 875) berechnet nach seinen Versuchen, in denen er den Nahepunkt für ein mit rothem und ein mit violettem Lichte beleuchtetes Object bestimmte, die Distanz der Brennpunkte auf 0,58 bis 0,62 Mm., im Mittel also auf 0,6 Mm. (HELMHOLTZ, Physiol. Optik p. 127—131).

Um nun die Chromasie des Auges experimentell nachzuweisen, blicke man auf die Grenze zwischen einem schwarzen und weissen Felde, etwa auf den Rahmen einer Fensterscheibe gegen weisse Wolken und schiebe ein undurchsichtiges Blatt dicht vor dem Auge bis zur Mitte der Pupille vor, so erscheint die Grenze zwischen den beiden Feldern blau gesäumt oder gelb gesäumt, je nachdem man das Kartenblatt von der Seite des weissen oder von der Seite des schwarzen Feldes vor die Pupille schiebt (NEWTON, Opticks Bd. II. P. II. Prop. VIII. 1717, p. 144).

Blickt man bei für die Ferne accommodirtem Auge auf eine nahe vor dem Auge befindliche weisse Linie auf schwarzem Grunde, so erscheint dieselbe mit gelbem oder röthlichgelbem Saume, in der Mitte des Zerstreuungsbildes aber ein blauer Streifen. — Ebenso ist die Erscheinung, wenn man durch ein feines Loch in einem Kartenblatte auf einen weissen Hintergrund blickt und das Loch nicht gerade vor die Mitte der Pupille hält, oder statt des Loches durch einen schmalen Spalt blickt. — Ferner erscheinen die Nadeln im Scheiner'schen Versuche (§ 13) farbig gesäumt oder, wenn sie fein genug sind, ganz und gar bläulich oder gelbröthlich gefärbt. — Sticht man (CZERMAK, Physiol. Studien in Wiener Akademie-Berichte XVIII. p. 363) einen 2—4 Mm. Durchmesser haltenden Kreis von 10 bis 20 feinen Löchelchen in ein Kartenblatt und blickt durch dieselben nach dem Himmel oder einer hellen weissen Fläche so, dass die gelben oder blauen Säume der Zerstreuungsbilder sich decken, so erscheint in der Mitte des Kreises ein gelber oder blauer Fleck, je nachdem das Kartenblatt sich diesseits oder jenseits des Accommodationspunktes befindet. Je weiter die Pupille ist, um so deutlicher

ist die Chromasie und umgekehrt: bei durch Atropin erweiterter Pupille er-scheinen alle dunkeln Objecte mit heller Begrenzung farbig gesäumt. Zweck-mässiger ist es, statt mit weissem Lichte zu experimentiren, ein gefärbtes Glas vor die Augen zu bringen, welches die mittleren Farbentöne des Spectrums nich durchlässt, sondern nur die rothen und die blauen (oder violetten) Strahlen, z. B die gewöhnlichen violetten oder die kobaltblauen Gläser: wo bei den angegebene Versuchen mit weissem Lichte ein Gelb erscheint, sieht man dann roth, wo dor blau erscheint, violett oder blau. (Helmholtz, Physiol. Optik p. 127.)

Die verschiedene Brechung der Augenmedien für verschiedene Farbenstrahle des Spectrums ergiebt sich auch daraus, dass ein für das rothe Licht des Spectrum accommodirtes Auge nicht zugleich für das blaue oder violette Licht desselbe accommodirt ist. Sowohl das Auge, als auch ein Fernrohr oder Mikroskop müsse anders eingestellt werden für die rothe, wie für die übrigen Abtheilungen de Spectrums: Fraunhofer fand, dass ein für die rothgelbe Farbe der Linie C de Spectrums auf ∞ eingestelltes Auge sich für die Linie G (zwischen Indigo un Violett) auf 500 bis 600 Mm. nähern musste, um die Objecte deutlich zu sehen (Gilbert's Annalen 1814, Bd. 56, p. 304.)

Dass wir für gewöhnlich von der Chromasie des Auges nichts bemerken, lieg wohl hauptsächlich daran, dass wir selten bei halbverdeckter Pupille Grenzen vo Hell und Dunkel sehen, zum Theil aber auch daran, dass wir nicht darauf achten sobald man aufmerksam auf chromatische Erscheinungen wird, sieht man sie ga nicht selten. Es scheint, dass emmetropische oder fernsichtige Augen leichte die Chromasie bemerken, als myopische Augen.

§ 20. Entoptische Erscheinungen. (cf. Snellen und Landolt: Ent optoscopie in III. 1, p. 173—180 dieses Handbuches.)

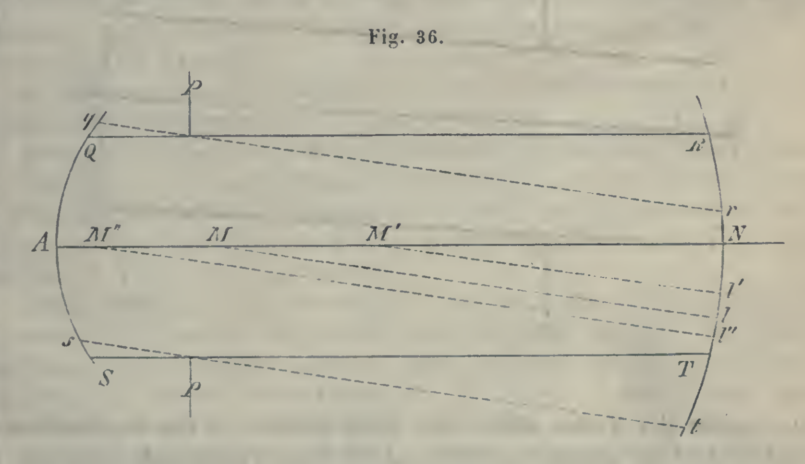
Man versteht unter entoptischen Erscheinungen diejenigen Bilder, welch von den in den brechenden Medien des Auges gelegenen Objecten auf di empfindende Schicht der Netzhaut geworfen werden. Diese Bilder treten auf:

1) wenn ein leuchtender Punkt sich im vorderen Brennpunkte des Auge befindet; dann gehen die Strahlen in den brechenden Medien parallel und ein i denselben befindliches Object, z. B. die Iris, muss einen Schatten auf die Netz haut werfen, welcher von gleicher Grösse wie das Object ist. Dies ergiebt sic aus Figur 30 in § 17. — Es bedarf kaum der Bemerkung, dass, wenn der leuch tende Punkt sich noch näher am Auge befindet, als der vordere Brennpunkt die Strahlen innerhalb des Auges divergirend werden, wenn er dagegen etwa weiter entfernt, als der vordere Brennpunkt, sich befindet, die Strahlen ei wenig convergiren müssen. Dadurch wird aber nichts weiter als die Grösse de geworfenen Schattens verändert. Wenn aber der leuchtende Punkt in der vor deren Brennebene bewegt wird, so wird daraus unter bestimmten Bedingunge eine Bewegung des Bildes hervorgehen, welche gleichsinnig mit der Bewegun des leuchtenden Punktes oder entgegengesetzt derselben erscheint. Liegt näm lich das entoptisch gesehene Object in der Pupillarebene oder wenig von derselbe entfernt, so ist die Bewegung des Bildes Null, liegt es vor der Pupillarebene, s ist sie entgegengesetzt, liegt es hinter der Pupillarebene, so ist sie gleichsinnig Listing (Beitrag zur physiologischen Optik, Göttingen 1845, abgedruckt aus de Göttinger Studien 1845), welcher diese von den Bewegungen des leuchtende

unktes oder des Auges abhängige Lagenveränderung des entoptischen Bildes ierst beobachtet hat, bezeichnet dieselbe als relative entoptische Parallaxe nd benutzt dieselbe zur Auffindung der ungefähren Lage des Objectes im uge.

Stellt nach Listing (p. 42) Figur 36 in einem verticalen Durchschnitt des uges QAS die erste Grenzfläche, PP die Pupille, RNT die Netzhaut und AN ie Augenaxe vor und sind QR und ST die Grenzstrahlen des zur Axe parallelen ichtcylinders im Auge, für die erste Stellung des leuchtenden Punktes in der

Fig. 36.

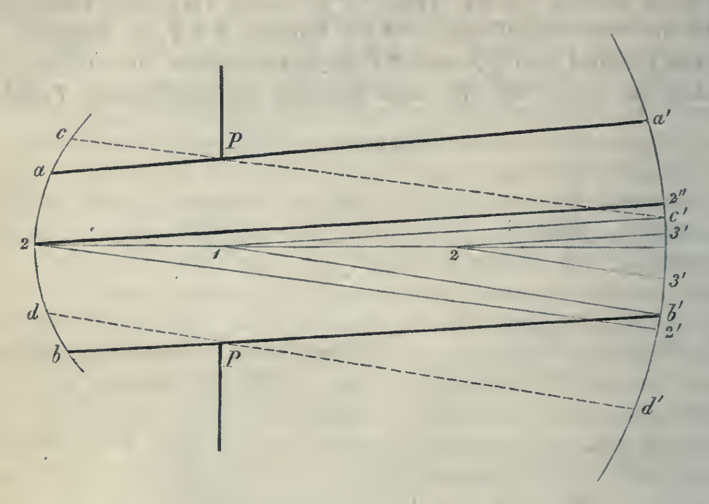


xe — sind ferner in M'', M, M' schattenwerfende Körper vor, in und hinter er Pupillarebene, so werden alle drei Körper ihre Schatten nach N werfen. Sind ir die zweite Stellung des leuchtenden Punktes qr und st die Grenzstrahlen, so erden die Schatten der Körper M'', M, M' nach l'' l und l' auf die Netzhaut llen. In beiden Stellungen des leuchtenden Punktes wird M in der Mitte des rstreuungskreises erscheinen, M' aber eine Versetzung im Zerstreuungskreise ach oben, M'' nach unten erleiden. Diese Ortsveränderungen würden bei Beegung des leuchtenden Punktes nach unten die entgegengesetzten sein. Die innenobjecte werden folglich je nach ihrer Entfernung von der Ebene der Pupille eränderungen in ihrer scheinbaren Lage unter sich und gegen den Zerstreuungsreis durch die Bewegungen des leuchtenden Punktes (oder die Bewegungen des uges) erleiden, und zwar alle vor der Pupille befindlichen Objecte eine den Beegungen des leuchtenden Punktes entgegengesetzte, alle hinter der Pupille efindlichen eine mit den Bewegungen des leuchtenden Punktes gleichsinnige ewegung.

Genauer lässt sich nach der von Donders (Anomalien p. 170) angegebenen ethode die Tiefenlage der Schatten werfenden Objecte bestimmen. Donders lickt statt auf einen auf zwei in der vorderen Brennebene befindliche leuchtende unkte (erhellte Löcher von 0,1 Mm. Durchmesser von 2,5 Mm. bis 3 Mm. Distanz i einem Schirme). Es bilden sich dann zwei in sich homocentrische Lichtlinder Figur 37 $aa'bb'$ und $cc'dd'$ unter einem solchen Winkel, dass die auf ie Netzhaut projicirten Kreise einander ungefähr zur Hälfte decken und wie in igur 38 erscheinen: von einem in der Mitte der Pupillarebene gelegenen Punkte 1

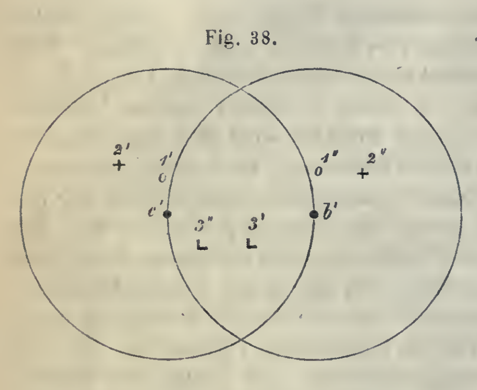
(Figur 37) liegen die beiden entoptischen Schatten genau in der verticalen Mittellinie der beiden Kreise (1′ 1″ in Figur 38), im Kreise $a'b'$ Figur 37 in c im Kreise $c'd'$ bei b' und deshalb genau eben so weit von einander entfernt, wie

Fig. 37.



die Mittelpunkte der Kreise selbst; für jeden anderen in der Pupillarebene gelegenen Punkt ist der gegenseitige Abstand der beiden entoptischen Schatten auch gleich. — Für einen in der Hornhaut gelegenen Punkt 2 fallen die Schatten als 2′ und 2″ weiter auseinander, dagegen für einen hinter der Pupillarebene gelegenen Punkt 3 als 3′ und 3 näher an einander. Bezeichnet man den Abstand der Mittelpunkte der beiden Kreise mit d, den Abstand der Pupillarebene von der Netzhaut mit D, die Entfernung der doppelten Schatten von einander mit d', so findet sich die Entfernung des schattenwerfenden Objectes D', da $\frac{d}{D} = \frac{d'}{D'}$ ist,

Fig. 38.



$$D' = \frac{D \cdot d'}{d}$$

D ist nach § 11 zu ermitteln und etwa = 19 Mm. gefunden worden; d und d' müssen gemessen werden. Donders misst die entoptischen Bilder in der Weise, dass er nach der Methode *à double vue* dieselben mit dem anderen Auge auf ein Blatt weissen Papiers projicirt sieht und auf demselben zeichnet oder misst. Ueber die Methode *à double vue* s. Snellen und Landolt dieses Handbuch III. 1, p. 110. Nach den hier angegebenen Methoden sind folgende entoptische Erscheinungen wahrgenommen worden:

a) Das entoptische Bild ist, da es durch den Schatten der Iris begrenzt wird

meistens kreisrund, entsprechend der Form der Pupille, mit deren Verengung und Erweiterung es an Grösse ab- und zunimmt. Abweichungen der Pupille von der Kreisform treten auch im entoptischen Bilde hervor (Listing, Beiträge p. 50, Fig. 20, 25 u. s. w.);

b) Punkte, Kreise, Streifen von Objecten auf der Hornhaut, Secret der Meibom'schen Drüsen, Schleimklümpchen, Thränenflüssigkeit (Listing, Fig. 13);

c) Falten und wellenförmige Kräuselung der Hornhaut, namentlich wenn vorher ein Druck auf das Auge ausgeübt worden ist (Listing, Fig. 14—16);

d) eine radienförmige Figur, von Donders als Linsenspectrum bezeichnet, auch von Listing mehrfach abgebildet (Donders, Anomalien p. 169, Fig. 104. Listing, Fig. 18, 32, 36);

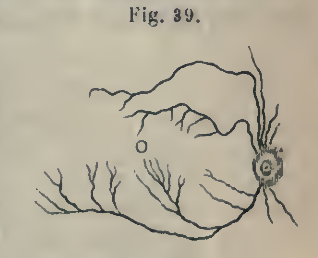
e) verschiedene Körner, Kugeln, Fasern, Perlschnüre, Membranen des Glaskörpers (Donders, Fig. 100—103. Listing, Fig. 26).

Beweglich sind von diesen entoptischen Bildern diejenigen, welche von den Objecten auf der Hornhautoberfläche herrühren, so wie Körner, Fasern und Membranen, welche im Glaskörper 0,5—3 Mm. vor der Netzhaut liegen. Unbeweglich sind verschiedene Körner, Kugeln und Flecken, so wie das Linsenspectrum.

Donders und Doncan (De corporis vitrei structura. Diss. inaug. Trajecti ad Rhenum 1854) haben die Anwesenheit von Objecten, die diese entoptischen Erscheinungen hervorbringen können, durch mikroscopische Untersuchung des Glaskörpers an todten Augen constatirt. Mittelst des Augenspiegels lassen sich grössere entoptische Objecte gleichfalls nachweisen.

2) Wenn das Loch eines Schirmes, welches die entoptischen, bisher angegebenen Objecte sehen lässt, einige Zeit hin und her bewegt wird, so erscheint die sogenannte Purkinje'sche Aderfigur, Figur 39 (nach Purkinje's Fig. 23), und von den übrigen entoptischen Objecten ist nichts mehr zu sehen. (Purkinje, Beobachtungen und Versuche zur Physiologie des Gesichtssinnes Bd. I, Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht p. 89, Figur 23 und 24.); Noch rascher und deutlicher kommt dieselbe zum Vorschein, wenn man einen schmalen Spalt in der vorderen Brennebene hin und her bewegt und dabei nach einem gleichmässig hellen Grunde, z. B. dem Himmel blickt. Man sieht die um den gelben Fleck gelegenen Gefässverzweigungen auf hellem Grunde als dunkle Linien, welche oft mit einem helleren Rande verbrämt sind — oder als hellere Linien auf weniger hellem Grunde mit dunklerer Verbrämung — und in der Mitte den Schatten einer kreisförmigen Vertiefung, der *Fovea centralis* (Burow, Müller's Archiv 1854, p. 166 beschreibt sie als konische Hervorragung, was indess nur unrichtige Deutung ist). Bei horizontaler Bewegung des Loches oder Spaltes sieht man die verticalen, bei verticaler Bewegung vorwiegend die horizontalen Gefässe. Die parallaktische Bewegung erscheint gleichsinnig mit der Bewegung des Loches. Dass nur bei bewegter Lichtquelle die Aderfigur und die Centralgrube sich abbilden, erklärt man aus einer rasch abnehmenden Reizbarkeit der Netzhautelemente.

Fig. 39.



3) Die Purkinje'sche Aderfigur erscheint ferner, wenn man im finstern Raume

eine Kerzenflamme wenige Zoll vor dem Auge langsam hin und her bewegt, und zwar als dunkle Gefässverzweigung auf hellem goldgelbem Grunde. Man kann durch Bewegung des Lichtes in verschiedener Richtung die Gefässe der Netzhaut von ihrer Eintrittsstelle in der *Papilla optica* aus weithin verfolgen. Man sieht nach dieser Methode die Figur am leichtesten und deutlichsten, wenn der Grund, auf den man blickt, möglichst lichtlos ist, z. B. in einem grossen Saale, dessen Wände durch die kleine Flamme kaum merklich beleuchtet werden. — Ueber die nach dieser, so wie nach der folgenden Methode zu beobachtende parallaktische Bewegung der Aderfigur soll sogleich gehandelt werden.

4) Die Purkinje'sche Aderfigur kann hervorgerufen werden durch intensive Beleuchtung der Sclerotica an einer möglichst beschränkten Stelle, z. B. indem das mittelst einer Convexlinse concentrirte Licht der Sonne oder einer Lampe auf die Sclerotica möglichst entfernt von der Hornhaut geworfen wird, und die beleuchtete Stelle gewechselt wird. Sehr geeignet zur Erzeugung eines hellen Lichtfleckes auf der Sklera ist auch ein Concavspiegel, z. B. der Augenspiegel. Die Aderfigur erscheint dann dunkel auf gelbrothem, oft goldglänzendem Grunde.

Bei allen Methoden zur Hervorbringung der Purkinje'schen Aderfigur ist es nothwendig, dass die Lichtquelle bewegt wird, oder dass Beleuchtung und Beschattung wechseln. Es rührt dies wohl daher, dass der Eindruck des Schattens so schwach ist, dass er nur unmittelbar bei oder nach seiner Entstehung empfunden werden kann, bald aber eine Abstumpfung der Netzhaut für die geringe Lichtdifferenz eintritt.

In Bezug auf die parallaktische Bewegung der Aderfigur ist aber noch zu bemerken erstens, dass die Bewegung der Aderfigur gleichsinnig ist mit der Bewegung der Lichtquelle, wenn die Figur durch Beleuchtung der Sclerotica mittelst einer Sammellinse, wenn sie durch Bewegung eines kleinen Loches vor der Pupille hervorgebracht wird, und endlich ist sie gleichsinnig, wenn die in der Nähe des Auges bewegte Kerzenflamme in einer den M e r i d i a n e n des Augapfels

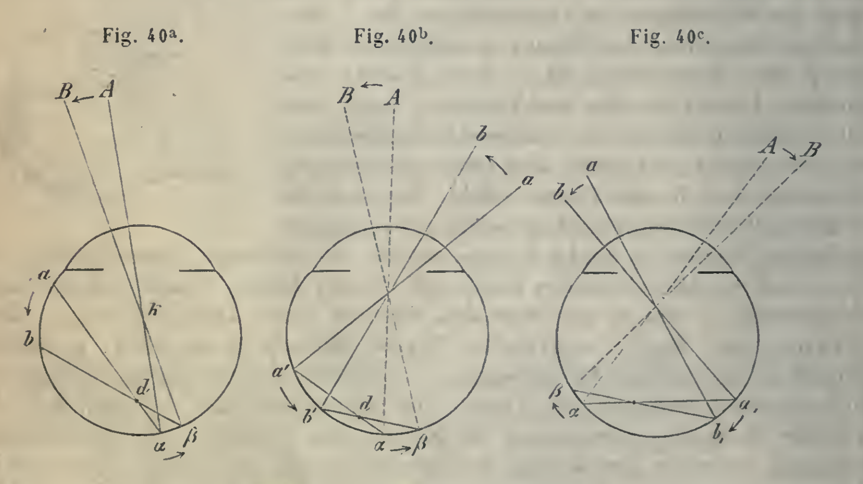


Fig. 40a. Fig. 40b. Fig. 40c.

entsprechenden Linie bewegt wird, ungleichsinnig aber, oder entgegengesetzt, wenn die Kerzenflamme in einem Parallelkreise bewegt wird. Nach Heinrich Müller's Theorie (Würzburger Verhandlungen 1855, Bd. V. p. 411) erklären sich

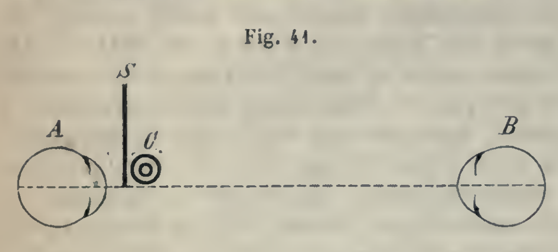
liese parallaktischen Bewegungen folgendermassen: ist in Figur 40ª der Punkt *d* las Netzhautgefäss, *a* der leuchtende Punkt, welcher auf der Sklera sich nach *b* ewegt, so werden *α* und *β* die Schatten von *d* sein, welche sich entgegengesetzt ewegen. Da die Projection der Netzhautempfindungen nach aussen ungefähr lurch den Knotenpunkt des Auges erfolgt (s. §59), so bewegt sich die Projection les Gefässschattens von *A* nach *B*, also gleichsinnig mit dem hellen Punkte *a* und . — Ist ferner in Figur 40ᵇ *a* die Lichtflamme, welche sich nach *b* bewegt, so ind *a'* und *b'* die Stellen im Innern des Auges, in welchem das Bild von der erzenflamme entworfen wird: diese Stellen *a'* und *b'* werden zu leuchtenden unkten (entsprechend *a* und *b* in Figur 40ª) und werfen die Gefässschatten *α* nd *β*; diese, nach aussen projicirt, bewegen sich von *A* nach *B*, also gleichinnig mit *a* und *b*. — Endlich sei in Figur 40ᶜ der Punkt *a* in der Ebene des apieres gelegen, der Punkt *b* hinter derselben, so wird *b'* vor die Ebene, *β* inter die Ebene, *B* vor die Ebene sich bewegen müssen, also die Bewegung von 1 nach *B* entgegengesetzt sein der Bewegung von *a* nach *b*. (cf. Helmholtz, hys. Opt. p. 159. Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 393.)

Zweitens ist zu bemerken, dass die Grösse der parallaktischen Bewegung bhängig ist von der Distanz des schattenwerfenden Gefässes bis zur empfindenlen Netzhautschicht. Die Beobachtungen von Heinrich Müller haben denselben u dem Schlusse geführt, dass die Stäbchen- und Zapfenschicht es sei, in welcher lie Erregung der Nerventhätigkeit ihren Anfang nehme. Wir kommen darauf in 57 zurück und bemerken hier nur, dass H. Müller's Beobachtungen über die arallaktische Bewegung der Aderfigur sehr gut mit den anatomischen Messungen ber die Entfernung der Blutgefässe der Netzhaut von der Stäbchenschicht stimmen.

§ 21. **Reflexion des einfallenden Lichtes vom Augenhintergrunde.** (cf. Snellen und Landolt: Ophthalmoscopie III. 1, p. 93—173 dieses Iandbuches.) Von dem Lichte, welches zum Auge gelangt, wird ein Theil von len brechenden Medien an den Oberflächen katoptrisch zurückgeworfen, ein anlerer Theil wegen der unvollkommenen Durchsichtigkeit der brechenden Medien liffus zerstreut, ein dritter Theil, welcher bis zum Hintergrunde des Auges geangt, theils von der Netzhaut und Chorioidea absorbirt, theils diffus wie von iner nicht spiegelnden Fläche reflectirt und geht zum Theil durch die Pupille ach aussen zurück. Wegen der Schwärze der Chorioidea wird der durch die upille zurückgehende Theil des Lichtes verhältnissmässig gering sein müssen, nd schon aus diesem Grunde muss uns die Pupille eines beobachteten Auges ichtarm oder dunkel erscheinen. Dass uns die Pupille eines Auges dunkel erscheint, hat ausserdem seinen Grund in den Brechungsverhältnissen des Auges: ler leuchtende Punkt und sein Bild, im accommodirten Auge auf der Grenze von etzhaut und Chorioidea, sind conjugirte Punkte: die vom leuchtenden Punkte usgehenden Strahlen gehen auf demselben Wege zu dem Bildpunkte, auf welchem lie vom Bildpunkte ausgehenden Strahlen zum leuchtenden Punkte zurückkehren. st also ein beobachtetes Auge auf eine Lichtquelle gerichtet und für dieselbe ccommodirt, so kann das von der Chorioidea zurückkehrende Licht nur nach der ichtquelle wieder hingehen, nicht aber nach einem etwa neben der Lichtquelle efindlichen beobachtenden Auge. Ist das beobachtete Auge nach der Pupille des eobachters gerichtet und für dieselbe accommodirt, so empfängt der Beobachter

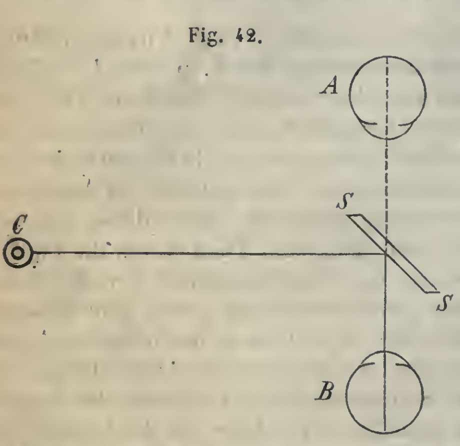
nur das von seiner eignen dunkeln Pupille in das beobachtete Auge gelangend und von dessen Chorioidea zurückkehrende Licht. Immer kommt also kein Lich aus der Pupille des beobachteten Auges in das des Beobachters. — Ist dagege das beobachtete Auge nicht für das leuchtende Object accommodirt, so kann Lich in das Auge des Beobachters gelangen und unter günstigen Umständen so star sein, dass die beobachtete Pupille hell oder leuchtend erscheint. Ist in Figur 4 *A* das Auge des Beobachters *B* das beobachtete Auge, eine helle Flamme und *S* ei Schirm, welcher das Auge de Beobachters vor der Blendun durch das helle Licht schützt und sieht nun der Beobachte gerade an dem Schirme vor bei in das beobachtete Auge so erscheint die Pupille des Auges *B* hell, wenn dasselbe nicht für die Flamm accommodirt ist, dunkel bei Accommodation für dieselbe. (Helmholtz, im Archi für physiologische Heilkunde 1852, II. p. 827 und Physiol. Optik p. 166.)

Fig. 41.



Noch günstiger würden offenbar die Verhältnisse für das Leuchten der Pupille sein, wenn sich die helle Flamme auf der Linie befände, welche die Pupillencentra des beobachtenden und des beobachteten Auges verbindet. Bei der Anordnung in Figur 41 würde die zu beobachtende Pupille selbst von der undurchsichtigen Lichtflamme verdeckt werden, dagegen kann eine Anordnung, wie si in Figur 42 skizzirt ist, das Leuchten der Pupille bewirken. Bei dieser Anordnun beobachteten Brücke (Müller's Archi 1847, p. 225) und v. Erlach da Leuchten der Pupille, und Helmholt gründete hierauf den Augenspiege (Helmholtz, Beschreibung eine Augenspiegels zur Untersuchung de Netzhaut im lebenden Auge, Berli 1851). Ist *A* in Figur 42 wieder da Auge des Beobachters, *B* das beobachtete Auge, *C* die Lichtflamme un *S S* eine ebene Glasplatte, welche s gestellt ist, dass das von *C* kommend Licht zum Theil nach der Pupille de beobachteten Auges *B* hin gespiegel wird, zum Theil allerdings durch di Platte hindurchgeht, so gelangt vo der Flamme kein Licht in das Auge des Beobachters, als dasjenige, welches au dem beobachteten Auge reflectirt wird. Helmholtz's Gedanke, welcher ihn zu Erfindung des Augenspiegels führte, war nun, dass, wenn der Hintergrund de Auges beleuchtet wäre, es möglich sein müsste, denselben deutlich zu sehen: d es nicht möglich ist, dass das Auge des Beobachters sich für den Hintergrund de zu beobachtenden Auges accommodiren kann, so ermöglichte Helmholtz dies durc Einschaltung von Glaslinsen: diese Zusammenstellung einer unbelegten Glas

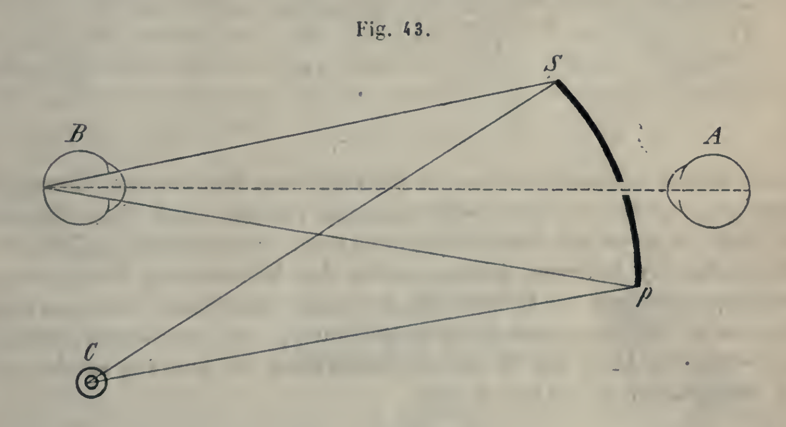
Fig. 42.



latte und einer vor das Auge des Beobachters zu bringenden Glaslinse, um für len Hintergrund des beobachteten Auges accommodiren zu können, war der erste ugenspiegel von Helmholtz.

Ein anderes Princip, den Hintergrund des Auges zu beleuchten, wurde nach rfindung des Augenspiegels von Helmholtz zuerst von Ruete (Der Augenspiegel nd das Optometer, Göttingen 1852) ersonnen: Ruete wendete statt der reflecirenden Glasplatte einen in der Mitte durchbohrten Hohlspiegel an, welcher das icht in das beobachtete Auge reflectirt und durch dessen Durchbohrung der Beachter blickt. In Figur 43 ist A das Auge des Beobachters, B das beobachtete uge, C die Lichtflamme, Sp der in der Mitte durchbohrte Hohlspiegel, durch

Fig. 43.



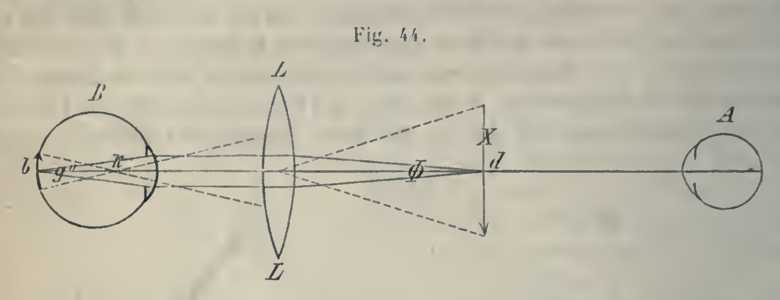
lessen centrales Loch der Beobachter A in das beobachtete Auge, welches von lem reflectirten Lichte sehr stark erhellt ist, blickt. Durch Glaslinsen, welche or oder hinter dem Concavspiegel eingeschaltet werden, kann das Auge des Beachters in den Stand gesetzt werden, den Hintergrund des beobachteten Auges leutlich zu sehen.

Die verschiedenen Formen der Augenspiegel, die durch sie zu erreichende ntensität der Beleuchtung, die Anordnungen der Linsen, um den Augenhinterrund im aufrechten und umgekehrten Bilde zu sehen, sind in dem Abschnitt Ophthalmoscopie« III. 1, p. 93 von Snellen und Landolt ausführlich besprochen vorden. Ich führe hier nur noch kurz die Methoden an, ein deutliches Bild von lem beleuchteten Augenhintergrunde zu erhalten.

Denken wir uns der Einfachheit wegen das beobachtete Auge emmetropisch nd accommodationslos, so wird ein deutliches Bild von dem Augenhintergrunde n unendlich grosser, oder wenigstens erst in sehr grosser Entfernung entworfen verden. Der Beobachter würde ein deutliches Bild von dem Augenhintergrunde lso erst sehen, wenn er sein Auge für das von dem Augenhintergrunde entvorfene Bild accommodirte: dann wird aber wegen der grossen Entfernung der eiden Augen von einander das Bild des Augenhintergrundes so klein, dass doch ichts zu erkennen sein würde. Macht man nun die aus dem beobachteten Auge arallel austretenden Strahlen so stark convergent, dass das extraoculare Bild des ugenhintergrundes dicht vor dem beobachteten Auge liegt, so wird der Beachter dies Bild in dem Nahepunkte seines Auges und in geringerer Entfernung

von dem Augenhintergrunde, als vorher sehen. Dies wird bewerkstelligt dadurch, dass man eine Convexlinse nahe vor das beobachtete Auge bringt, welche die Strahlen früher vereinigt, und ein reelles Bild in dem Brennpunkte der Linse entwirft. Ist in Figur 44 B das beobachtete, A das Beobachterauge, L die Convexlinse von der positiven Brennweite Φ und wird das Bild in dem Brennpunkte

Fig. 44.



d der Convexlinse entworfen, so zeigen die Pfeile das Bild von dem Hintergrunde des Auges an, welches von dem Beobachterauge gesehen wird. Seine Entfernung von der Linse ist gleich der Brennweite der Linse. Seine Grösse ergiebt sich aus der Entfernung des hinteren Knotenpunktes des beobachteten Auges von dem Augenhintergrunde und der Brennweite der Linse. Bezeichnen wir nach Snellen und Landolt p. 123 die Grösse des Objectes mit b, die des Linsenbildes mit X, die Brennweite der Linse mit Φ und die Entfernung des hinteren Knotenpunktes von der Netzhaut mit g'', so haben wir

$$X = \frac{b \cdot \Phi}{g''}$$

und wenn wir $b = 1$ setzen, so ergiebt sich die Vergrösserung $= \frac{\Phi}{g''}$. Wir haben g'' nach § 11 für Listing's schematisches Auge $= F_2 - K_2 = 22{,}6470 - 7{,}6398 = 15{,}0072$, wofür wir 15 Mm. setzen (s. § 12). Für eine Convexlinse von 30 Mm. Brennweite würde daher die Vergrösserung des Netzhauthintergrundes eine 2malige, für eine Linse von 60 Mm. Brennweite eine 4malige sein. Da die Brennweiten der Linsen nach Zollen gerechnet werden und durch $\frac{1}{\Phi}$ bezeichnet, so würde, da 1 Zoll $= 27$ Mm., eine Convexlinse $\frac{1}{2}$ eine 3,6malige Vergrösserung geben.

Man kann zweitens den Augenhintergrund eines emmetropischen accommodirten Auges deutlich sehen, wenn man die aus dem Auge austretenden Strahlen divergirend macht, so dass sie von einem hinter dem zu beobachtenden Hintergrunde gelegenen Punkte zu kommen scheinen, also ein virtuelles Bild von dem Hintergrunde entwirft. Dies wird erreicht, indem man zwischen das beobachtete und das Beobachterauge eine Concavlinse einschaltet von einer solchen negativen Brennweite, dass das Beobachterauge für die Entfernung des virtuellen Bildes accommodiren kann. Man könnte auch sagen: man vermindere durch eine Linse von negativer Brennweite die positive Brennweite des beobachteten Auges so weit, dass der hintere Brennpunkt in eine Entfernung rückt, für welche das Beobachterauge bequem sich accommodiren kann. Die Entfernung, in welcher das

virtuelle Bild liegt, wird abhängig sein von der Entfernung, für welche das Auge des Beobachters sich accommodirt, und diese wieder von der Brennweite der Concavlinse und ihrem Abstande von dem beobachteten Auge. Wäre bei Accommodationslosigkeit des beobachteten Auges das Auge des Beobachters auch für ∞ accommodirt, so würde die Brennweite der Linse auch $= \infty$ sein müssen, d. h. eine Linse überhaupt nicht erforderlich sein. Ist aber das Auge des Beobachters auf 300 Mm. accommodirt, so wird, wenn wir die Entfernung der Linse von dem Auge vernachlässigen, auch die negative Brennweite der Linse diesen Werth haben müssen, da parallele Strahlen durch eine solche Linse so divergent werden, als kämen sie von einem in 300 Mm. Entfernung gelegenen Punkte. — Die Vergrösserung des Bildes wird abhängig sein von der Grösse des Netzhautbildes in dem Auge des Beobachters und der Entfernung, in welche es projicirt wird: liegt das Bild in der Entfernung g'' hinter dem Knotenpunkte und wird es in eine Entfernung von 300 Mm. vor diesem Knotenpunkte projicirt, so muss die Vergrösserung betragen $\frac{300\,\text{Mm.}}{g''}$. Da wir $g'' = 15$ Mm. gesetzt haben, so würde die Vergrösserung eine 20malige sein. (cf. III. 1 dieses Handbuches p. 116 u. f.)

II. Empfindung des Lichtes.

§ 22. Die Entstehung der Lichtempfindungen. Wir haben, so weit unser Bewusstsein reicht, fortwährend Lichtempfindungen, denn die Empfindung der tiefsten Dunkelheit ist eben so gut eine Lichtempfindung wie die Empfindung einer weniger tiefen Dunkelheit und wie die Empfindung von Helligkeit. Schon Purkinje (Beiträge II. 1825, p. 9) sagt: »Das Finstere und Schwarze gehört eben so gut unter die sichtbaren Gegenstände, wie das Lichte und Farbige.« — Lichtempfindung kommt zum Bewusstsein, ohne dass Augen vorhanden sind: Kranke, welche die Augäpfel (etwa durch Verwundungen) verloren haben, sind keineswegs frei von Lichtempfindungen und können sogar von sehr intensiven Helligkeitsempfindungen gequält werden, ohne dass eine äussere Ursache, ein äusserer Reiz vorhanden ist. Die Lichtempfindungen müssen daher zu Stande kommen in Organen, welche nicht im Auge, sondern im Gehirn liegen — wir sind indess nicht im Stande, das lichtempfindende Organ zu begrenzen nach der Seite hin, auf welcher die Lichtempfindungen zum Bewusstsein kommen.

Anderseits finden wir, dass Lichtempfindungen zum Bewusstsein kommen, wenn Licht in unser Auge gelangt, und die Grenze, an welcher die Lichtätherwellen aufhören und in Nerventhätigkeit umgesetzt werden, können wir mit grosser Sicherheit in die Stäbchen- und Zapfenschicht der Netzhaut verlegen. Was zu unserem Bewusstsein kommt, ist also die Thätigkeit des mit der Netzhaut beginnenden und in das Gehirn sich erstreckenden Sehorganes oder der Sehsubstanz.*) Können wir einen Reiz nachweisen,

*) Im Folgenden verstehe ich unter »Netzhaut« nicht blos die Ausbreitung des Opticus im Augapfel, sondern die ganze Nervenmasse von der eigentlichen Netzhaut bis zum

welcher die Thätigkeit der Sehsubstanz verändert, so bezeichnen wir die Lichtempfindung als eine objective, oder das Licht, welches wir empfinden, als objectives — ist ein solcher Reiz nicht nachweisbar, so nennen wir die Lichtempfindung subjectiv. Offenbar sind alle Lichtempfindungen, als bewusst werdende Thätigkeit unserer Sehsubstanz, subjective, und im gegebenen speciellen Falle ist oft die Unterscheidung zwischen objectivem und subjectivem Lichte künstlich und willkürlich: blickt man z. B. auf ein weisses Quadrat, welches auf schwarzem Grunde liegt, einige Zeit starr hin, schliesst dann die Augen und bedeckt sie mit den Händen, so sieht man, ohne dass objectives Licht in das Auge dringt, ein dunkles Quadrat mit hellem Hofe auf weniger dunklem Grunde. Man nennt die Empfindung des geschlossenen Auges subjectiv, gleichwohl ist der vorhergegangene objective Reiz die Ursache der sogenannten subjectiven Lichtempfindung. — Dreht man eine Scheibe, deren eine halbe Kreisfläche schwarz, deren andere weiss ist, sehr schnell, so sieht man eine graue Scheibe und bezeichnet das entstehende Grau als ein objectives: gleichwohl ist das Object schwarz und weiss, aber nicht grau, und wird nur durch die Art unseres Empfindens grau. Dasselbe gilt von allen Farbenmischungen, welche ein Grau als Empfindung auslösen.

Die Lichtempfindungen sind ferner die einzigen zum Bewusstsein kommenden Empfindungen des Sehorgans, und J. Müller (Handbuch der Physiologie II. 1840, p. 254) bezeichnete sie daher als die specifische Energie desselben, da der Sehnerv keine andere Empfindung, als Lichtempfindung hervorbringen und eine ähnliche Empfindung durch keine anderen Nerven zum Bewusstsein gebracht werden kann. Was zur Hervorbringung einer Lichtempfindung in der Sehsubstanz für ein Process ablaufen muss, wissen wir nicht; nach Hering's Theorie (Zur Lehre vom Lichtsinn. V. in Wiener Akademie-Ber. 1874, Bd. 49, III. Abth. § 27) würde ein chemischer Process, ein Stoffwechsel in der Sehsubstanz die Grundlage des Empfindungsvorganges sein — etwas Näheres ist darüber nicht bekannt, namentlich fehlt noch jede Einsicht in den Mechanismus, durch welchen chemische oder physikalische Kräfte in die specifische Resultante, die Lichtempfindung, umgesetzt werden. Talma (Over licht-en kleurperceptie, Bybladen 14de Verslag, Nederl. Gasthuis voor ooglyders p. 129—176 im Auszuge in Nagel's Jahresbericht für Ophthalmologie für 1873, IV. p. 90) hat die Wirkung des Lichtes auf die Netzhaut als eine photochemische näher zu begründen gesucht und erklärt die Lichtperception für einen besonderen Chemismus in den Ganglienzellen des Gehirns, welcher angeregt wird in der Netzhaut und durch die Nerven elektromotorisch weiter geleitet. Es folgt daraus, dass wir über die Wirkung, welche objective auf die Sehsubstanz einwirkende Vorgänge ausüben, keinerlei Kenntniss haben können — dass endlich die Erkenntniss der Objecte nur so weit möglich ist, als dadurch Veränderungen besonderer, dem Objectiven nicht parallellaufender Art im Sehorgane hervorgebracht werden. Diese Verhältnisse hat schon Kant (Kritik der reinen Vernunft. Leipzig 1828, p. 43) klargelegt. Helmholtz (Physiol. Optik p. 194 und p. 442) bezeichnet daher unsere Sinnesempfindungen als Symbole des Objectiven: das Objective mit seinen Qualitäten

---

Centralorgan der Empfindung (nach dem Vorgange von Förster, Hemeralopie p. 26: s. Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 6 und Hering a. a. O. § 25).

ildet also eine Reihe des Geschehens, welche zwar in Beziehung steht zu der innesempfindung mit ihren Qualitäten, aber in einer bis jetzt nicht irgend beimmbaren Beziehung zu den Qualitäten der Sinnesthätigkeit. — (Man vergleiche erüber auch STEINBUCH, Beitrag zur Physiologie der Sinne, Nürnberg 1811.)

§ 22a. Classificirung der Lichtempfindungen. Jede Lichtempfinung ist qualitativ von allen übrigen Lichtempfindungen verschieden: die Empfinung z. B. eines hellen Grau ist eine andere Qualität der Empfindung, als die nes dunkleren Grau oder als die eines Gelb u. s. w. — Wir ordnen aber der ebersichtlichkeit und der Verständigung wegen die Empfindungen in gewissen, ım Theil nach der Verschiedenheit der vorausgesetzten Objecte oder objectiven eize gewählten Richtungen. Wir unterscheiden zunächst Empfindungen, welche ir gleichzeitig haben, von Empfindungen, die wir nach einander haben, und dem wir, der specifischen Energie unseres Denkorganes gemäss, die Vorstellung es Raumes produciren (KANT, Kritik d. r. V. p. 30, § 3) und mit den Lichtnpfindungen combiniren, gewinnen wir die Vorstellung, dass zwei Empfindungsalitäten extensiv sind, d. h. gleichzeitig an verschiedenen Orten des Raumes r erregendes Object haben. Ferner unterscheiden wir die Empfindungsqualiten nach der Wahrscheinlichkeit, ob ein Reiz von aussen her dieselben direct regt, oder ein nicht äusserer Reiz dieselben veranlasst habe, als objective und bjective Empfindungen, ohne, wie schon erwähnt, dabei consequent zu verhren. Drittens unterscheiden und ordnen wir Empfindungsqualitäten nach geissen Aehnlichkeiten, die sie mit einander haben, unter Zuhülfenahme von ehnlichkeiten und Verschiedenheiten, die wir an den Objecten anderweitig erittelt haben, z. B. Intensitäten der Lichtempfindung, indem wir Empfindungsalitäten, welche durch grössere oder geringere objective Lichtstärke hervorgeacht werden, zusammenreihen, und die ganze Reihe unterscheiden von einer deren Gruppe von Empfindungsqualitäten, welche in jene Reihe nicht passen, n Farbenempfindungen. Für diese suchen wir auch wieder aus der Qualität r Reize oder aus theoretischen Annahmen Eintheilungsgründe.

Wir finden bei einer solchen Systematisirung unserer Gesichtsempfindungen ancherlei Schwierigkeiten, weil wir in den Empfindungsqualitäten selbst inerlei Anhalt für die Systematisirung finden, und daher willkürlich, d. h. ich äusserlichen Bestimmungsgründen, Eintheilungsgründe aufzugreifen und in e unendliche Menge von gleichberechtigten Empfindungen gewaltsam einzuhren genöthigt sind.

Man unterscheidet 1) Lichtempfindungen, welche von der tiefsten Dunkelheit s zur grössten Helligkeit eine Reihe bilden; 2) Lichtempfindungen, welche ırch Licht von verschiedener Geschwindigkeit und daher verschiedener Brechırkeit hervorgebracht zu werden pflegen; 3) Lichtempfindungen, welche als umlich getrennt aufgefasst werden; 4) Lichtempfindungen, welche nicht durch jectives Licht hervorgebracht werden, sondern durch anderweitige Reize oder ıne nachweisbare Reize erregt werden. — Demgemäss nennen wir, insofern wir ısere Sinnesthätigkeiten benutzen zur Erkenntniss der objectiven Dinge 1) die ıhigkeit, verschiedene Helligkeiten zu unterscheiden, den Lichtsinn (AUBERT, f. O. III. 2, p. 63); 2) die Fähigkeit, Licht von verschiedener Brechbarkeit zu nterscheiden, den Farbensinn; 3) die Fähigkeit, Licht gleichzeitig und räum-

lich verschieden zu empfinden, den Raumsinn (E. H. Weber, Handwörterbuc der Physiologie III. 2, p. 533); 4) alle nicht durch objectives Licht erregte Lichtempfindungen bezeichnen wir als subjective Lichtempfindunger (Purkinje, Beobachtungen zur Physiologie der Sinne I. Beiträge zur Kenntniss de Sehens in subjectiver Hinsicht.)

In welche dieser Kategorien man einzelne, specielle Lichtempfindunge bringt, wird immer mehr oder weniger willkürlich sein — wie bei jeder System bildung muss man auch hier den Zusammenhang der Erscheinungen manchma zerreissen, manchmal Erscheinungen zusammenbringen, welche bei veränderte Gesichtspunkte nicht mehr zusammengehören. Bei einer Zusammenstellun dessen, was wir überhaupt mit unserem Sehorgane empfinden, kann es nur di Aufgabe sein, das Erforschte möglichst einfach und übersichtlich zu ordnen.

Hering (Zur Lehre vom Lichtsinne IV. p. 2 u. 3 in Wiener Akad.-Ber. 1874, Bd. 4 Abth. 3, § 21) bezeichnet die Empfindungsreihe der Lichtintensitäten, also die Empfindungs reihe vom tiefsten Dunkel bis zum hellsten Weiss mit dem Ausdruck »schwarzweisse Empfi dungsreihe«, indem er sehr richtig hervorhebt, dass man keinen Grund hat, Intensitäten de Lichtempfindung, welche der Empfindung von objectiven Lichtintensitäten entsprechen, a zunehmen. Der Ausdruck ist indess sprachlich nicht durchzuführen und man kann, oh Missverständnisse zu erzeugen, dafür von »Empfindung der Lichtintensitäten« sprechen.

A. Der Lichtsinn.

§ 23. Der Lichtsinn oder die Empfindung von Lichtintensi täten. Die Empfindung tiefer Dunkelheit, welche wir haben, wenn kein ob jectives Licht auf unser Sehorgan einwirkt, kann ganz allmälig durch unendlic viele Stufen übergehen in die Empfindung grösster Helligkeit und umgekehr Wir würden die Empfindung tiefster Dunkelheit, wenn wir sie für unser ge sammtes Sehorgan haben könnten, auch als Lichtempfindung ansehen müsser Indess empfinden wir die tiefste Dunkelheit nur dann, wenn irgend eine Stell unseres Sehorgans durch einen objectiven Lichtreiz getroffen wird; in einem vol ständig finsteren Raum haben wir nicht die Empfindung des tiefsten Schwar sondern sehen verschiedene helle Nebel, Lichtfunken, Lichtlinien in vielfache Wechsel. Lichtempfindung, im Sinne der Empfindung von Helligkeit, haben w also, so weit unser Bewusstsein reicht, immer. Die grösste Helligkeit andere seits, etwa das directe Sonnenlicht, wirkt rasch zerstörend auf unser Sehorgan wir kennen also weder das Maximum der stärksten Helligkeitsempfindung, noc das Maximum der Empfindung von Dunkelheit.

Zwischen diesen Extremen und zwar in unbestimmter Entfernung von beide sind unsere Lichtempfindungen stetem Wechsel unterworfen: bei Abhaltung alle objectiven Lichtes nimmt die Lichtempfindung allmälig zu — bei Einwirkung ob jectiven Lichtes nimmt sie je nach der Intensität desselben bald zu, bald ab. O es einen Helligkeitsgrad giebt, bei welchem die Lichtempfindung constant bleib wissen wir bis jetzt nicht. Nach Hering's Theorie (a. a. O. V. Mittheilung, § 27 würde dieser fortwährende Wechsel darin seinen Grund haben, dass die Licht empfindung Folge von Veränderungen der Sehsubstanz ist, welche sowohl durc den Ernährungsprocess oder den Assimilationsprocess derselben, als durc Zerstörung der Sehsubstanz in Folge von objectiven Lichtreizen, durch eine Dissimilationsprocess hervorgebracht werden; es würde denkbar sein

dass Assimilation und Dissimilation einander ganz gleich würden und dann müsste die Lichtempfindung constant sein. Wie lange uns diese Constanz zum Bewusstsein kommen würde, ist nicht bestimmt, vielleicht auch nicht bestimmbar, wir können aber vermuthen, dass es nicht lange dauern würde, wenn wir die Erfahrungen in anderen Nervengebieten in Betracht ziehen. Ein gleichmässiger Ton, ein gleichmässiger Druck, eine gleichmässige Temperatur wird gewiss immer empfunden, aber die Empfindung gelangt nur kurze Zeit zu unserm Bewusstsein. *Wir empfinden also immer nur Lichtdifferenzen*, ebenso wie wir nur Temperatur*differenzen* empfinden (Auerbach, De irritamentis nervorum studia critica. Diss. inaug. Berolini 1849, p. 27).

Die Schwierigkeit, vielleicht Unmöglichkeit, eine constante, constant zu unserm Bewusstsein kommende Empfindung in unserm Sehorgane herzustellen, lässt es von vornherein unerreichbar erscheinen, die Grösse des Wechsels in unserer Empfindung zu bestimmen, welche eben noch wahrgenommen werden kann. Wir können dagegen einigermassen den kleinsten objectiven Lichtreiz messen, welchen unser Sehorgan empfinden kann, und wir können ausserdem messen, welche Unterschiede von objectiven Helligkeiten ein Sehorgan eben noch als verschieden empfinden kann. Wir bestimmen damit die *Empfindlichkeit des Sehorganes für minimale objective Reizgrössen* und die *Empfindlichkeit für minimale Unterschiede von objectiven Lichtreizen*. Das sind die Grenzen, welche Fechner in seiner Psychophysik (Elemente der Psychophysik, Leipzig 1860, I. p. 50 und Psychophysisches Grundgesetz, Leipziger Abhandlungen 1858, IV. p. 458) als *absolute Reizschwelle* und als *Unterschiedsschwelle* bezeichnet hat.

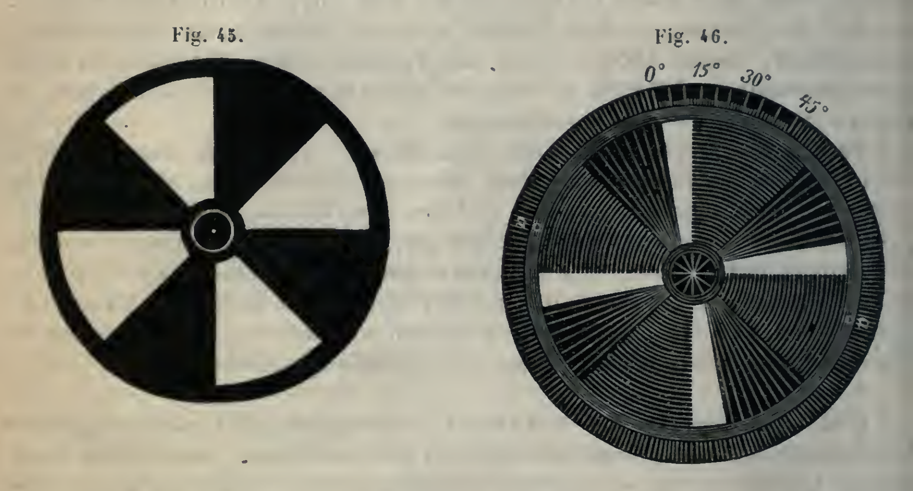
Da sich die Empfindlichkeit der Sehsubstanz fortwährend ändert, sowohl wenn Lichtreize auf dieselbe einwirken, als auch bei Abhaltung alles objectiven Lichtes, so ist zunächst festzustellen, welchen Gang die Empfindlichkeit oder Erregbarkeit des Sehorganes, oder wie wir gleichbedeutend damit sagen wollen, der Netzhaut nimmt, wenn kein objectiver Lichtreiz dieselbe erregt. Ich habe für die Veränderung der Empfindlichkeit der Netzhaut die Benennung »*Adaptation der Netzhaut*« eingeführt: wir werden zunächst den Gang derselben im lichtlosen Raume untersuchen. (Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 25.)

§ 24. *Adaptation der Netzhaut.* Wir können die Veränderungen der Netzhautempfindlichkeit beim Aufenthalte im lichtlosen Raume untersuchen, wenn wir eine Lichtquelle von sehr geringer Intensität und von variabler, aber messbarer Intensität beobachten. Muss die Intensität der Lichtquelle vermindert werden, um an der Grenze der Wahrnehmbarkeit zu bleiben, so ergiebt sich eine Zunahme der Empfindlichkeit. Ich habe in einem Zimmer, von welchem jedes Licht möglichst sorgfältig ausgeschlossen war (Phys. d. Netzhaut, p. 27), als Maass für die Empfindlichkeit einen über die Elektroden eines Daniel'schen Elementes gespannten Platindraht, welcher bei einer gewissen Länge glühend erschien, benutzt und ihn immer um je 1 Mm. verlängert, sobald ich im Stande war, ihn eben zu sehen. Die Lichtintensitäten wurden dann in ihrem Verhältniss zu einander bestimmt mittelst grauer Gläser, deren Lichtabsorption bekannt war. Die Zeit, welche verging, bis der Draht leuchtend erschien, wurde von einem Gehülfen im Nebenzimmer abgelesen und notirt. Die Absorption der grauen Gläser

wurde theils mit Hülfe gleicher Schatten, theils mit dem sogleich zu beschreibenden Episkotister bestimmt. Lässt man zwei Schatten von einem Stabe auf eine weisse Tafel durch zwei helle Lichter werfen, vor deren einem sich das zu untersuchende Glas befindet, so werden bei gewissen Entfernungen der Lichter von der weissen Tafel die beiden Schatten gleich erscheinen, wenn das Licht, vor welchem sich das absorbirende Glas befindet, der Tafel näher steht, als das freie Licht. Der Quotient aus den Quadraten der Entfernungen der beiden Lichter giebt die Grösse der Lichtabsorption des Glases. Für eines der grauen Gläser ergab sich Gleichheit der Schatten, wenn das Licht hinter dem Glase 535 Mm., das freie Licht 2630 Mm. von der Tafel entfernt war, das erstere Licht also 4,9mal näher war als das andere; setzen wir die Intensität der Beleuchtung des näheren Lichtes ohne Glas = 100, so ergiebt die Intensität der Beleuchtung durch das fernere Licht = 4,166 ...; das graue Glas lässt also nur 4,166% Licht durch und absorbirt 95,833% oder beinahe 96% Licht.

Der Episkotister (zuerst von TALBOT angegeben s. Plateau in Poggendorff's Annalen 1833, Bd. 35, p. 459, von mir zu Messungen der Absorption benutzt) besteht aus zwei über einander liegenden Scheiben, an deren jeder 4 Octanten ausgeschnitten sind, wie in Figur 45, welche so über einander geschoben und eingestellt werden können, dass die soliden Octanten der einen Scheibe ein be-

Fig. 45. Fig. 46.



liebiges Stück der Ausschnitte der anderen Scheibe verdecken, wie in Figur 46, und also nur durch die spaltenartigen Sectoren Licht hindurchgehen kann; werden die gegen einander festgeschraubten Scheiben rasch gedreht, so erscheinen sie wie ein graues Glas, und indem man nun den Sectorausschnitten eine solche Stellung giebt, dass ein durch die rotirenden Scheiben gesehenes Object um eben so viel verdunkelt erscheint, als wenn man sie durch das auf seine Lichtabsorption zu bestimmende graue Glas betrachtet, so findet man die Menge des durchgelassenen Lichtes: die Anzahl der Grade für die lichtdurchlassenden Sectoren, dividirt durch 360°, ergiebt die Menge des durchgehenden Lichtes. Für dasselbe Glas, welches nach der Schattenmethode 4,166% gab, fand ich mittelst des Episkotister 4,444% — eine Uebereinstimmung, welche genügend

ist, wenn man die Schwierigkeit, eine vollkommene Gleichheit zu beurtheilen, in Anschlag bringt (s. darüber in § 25).

Hat nun der Platindraht eine Länge, bei der er ohne Glas eben gesehen werden kann, und verkürzt man ihn darauf so weit, dass er durch das graue Glas eben gesehen werden kann, so entspricht die letztere Drahtlänge einer Lichtintensität, welche 24 bis 22 Mal grösser ist, als die erstere Drahtlänge. Nimmt man, was allerdings nicht ganz gerechtfertigt ist, an, dass innerhalb dieser Differenz der Drahtlänge, welche 6,5 Mm. im Mittel betrug, jede Verlängerung um 1 Mm. der anderen gleichwerthig, mithin $\frac{23}{6,5}$ eine Einheit ist, so wird die Verlängerung des Platindrahtes um je 1 Mm. einer Abnahme der Helligkeit um je 3,5 entsprechen. In der folgenden Tabelle X habe ich die Drahtlängen angegeben, bei denen nach der im ersten Stabe verzeichneten Zeit der Draht eben noch leuchtend erschien. Mit 0 ist die Zeit unmittelbar nach dem Eintritt ins finstere Zimmer bezeichnet.

Tabelle X.

Versuch I.		II.		III.		IV.	
Zeit.	Drahtlänge.	Zeit.	Drahtlänge.	Zeit.	Drahtlänge.	Zeit.	Drahtlänge.
0	19 Mm.	0	18 Mm.	0	19 Mm.	0	24 Mm.
1/2′	20 -	1/4′	19 -		20 -		25 -
1/2′	21 -	1/4′	20 -	2′	21 -		26 -
1′	22 -	1/4′	21 -		22 -	2′	27 -
1′	23 -	1/4′	22 -		23 -		28 -
2′	24 -	1/2′	23 -	2′	24 -		29 -
10′	25 -	3′	24 -	3′	25 -	1 1/2′	30 -
14′	26 -	5′	25 -	5′	26 -	2 1/2′	31 -
62′	27 -	38′	26 -	11′	27 -	10′	32 -
		85′	27 -	24′	28 -	48′	33 -
				78′	29 -	74′	34 -
91′	8 Mm.	132′	9 Mm.	125′	10 Mm.	138′	10 Mm.

Aus dieser Tabelle und aus Adaptationscurven, welche ich nach den Zahlen der Tabelle entworfen habe (Aubert, Physiol. d. Netzhaut, Figur 6 p. 37), ersieht man die Grösse und die Zunahme der Adaptation oder den Gang, welchen die Zunahme der Empfindlichkeit für minimale Lichtreize bei Abhaltung alles sonstigen Lichtes nimmt: die Empfindlichkeit für objective Lichtreize nimmt in den ersten Minuten rasch zu, dann immer langsamer und langsamer, und ist nach etwa 10 Minuten ungefähr 25 Mal, nach 2 Stunden ungefähr 35 Mal grösser als im Anfange.

Wenn der Platindraht eben anfängt sichtbar zu werden, so erscheint er nicht wie ein glühender Draht bei gewöhnlicher Tagesbeleuchtung, sondern farblos und matt, nicht glänzend. Ebenso erscheint nach längerem Aufenthalte im ganz finsteren Raume ein eiserner Tiegel mit eben noch schmelzendem oder eben erstarrendem Zink weiss leuchtend, gerade wie ein insolirter Porzellantiegel, was einer Temperatur von etwa 370° C. entsprechen würde. Nach Newton

(Gmelin, Handbuch der Chemie I. p. 163) wird Eisen im Dunkeln schwach-glühend bei 335° C., starkglühend bei 400°, in der Dämmerung leuchtend be 474°, im Hellen leuchtend bei ungefähr 538°.

Um meine Befunde auf bekanntere Objecte reduciren zu können, liess ich i das finstre Zimmer Tageslicht durch eine sehr gleichmässige mattgeschliffene Glas-platte in sehr geringer Menge einfallen und beobachtete, der Diaphragma-Oeffnung den Rücken kehrend, einen kleinen Streifen gewöhnlichen weissen Papiers vo $^1/_2$ Mm. Breite, welcher von der Lichtöffnung 5,5 M. entfernt war, in gewöhn-licher Sehweite. Unmittelbar nach dem Eintritt in das finstre Zimmer wurde de Papierstreifen sichtbar, wenn die Diaphragma-Oeffnung vor der Glasplatte 225 Mm betrug, 1 Minute später wenn sie 100 Mm., 4 Minuten später wenn sie 25 Mm. 30 Minuten später wenn sie 6,25 Mm. betrug. Die Empfindlichkeit hatte i diesem Versuche um das 36fache zugenommen, also mehr als in den Versuche mit dem Platindrahte. Setzen wir die Helligkeit der von diffusem Lichte an eine sehr hellen Tage beleuchteten matten Glastafel der Helligkeit einer weissen Wolk am Himmel, und weiter der des Mondes (der ja am Tageshimmel wie eine weiss Wolke erscheint) gleich, so würde bei der Entfernung des Objectes von der Licht-quelle, diese eine scheinbare Grösse (Gesichtswinkel) von etwa $^1/_{300}$ der Mond-scheibe oder die zwei- bis dreifache Grösse des Jupiter in der Opposition gehab haben — was eher zu hoch als zu niedrig gerechnet ist.

Wir schliessen hieran den Versuch, die Helligkeit der subjectiven Licht-empfindung im lichtlosen Raume zu bestimmen. Wenn wir nämlich im übrigen lichtlosen Gesichtsfelde ein eben merklich helles Object sehen, so könnten wir di empfundene Helligkeit auffassen als den Unterschied einer objectiven Helligkei von der Helligkeit der subjectiven Lichtproduction, oder nach Fechner's Ausdruc der Helligkeit des »Augenschwarz«. (Fechner, Psychophysisches Gesetz in Ab-handlungen der Leipziger Akademie 1858, IV. p. 482 und Psychophysik I p. 168.) Die gemessenen minimalen Lichtreize würden dann nicht als absolut Reizgrössen aufzufassen sein, sondern als Unterschiedsreize und damit die Unter-schiedsgrösse bestimmt sein zwischen dem subjectiven Lichtreize und de kleinsten objectiven Reize. Der subjective Reiz (nach Hering's Auffassung di Assimilationsgrösse) würde seiner Grösse nach mit einem objectiven Lichtreiz verglichen werden können, wenn wir die Unterschiede bestimmten, welche seh kleine objective Lichtreize haben müssen, um empfunden werden zu können. Das ist annähernd möglich. Bei sehr geringer Helligkeit der Objecte muss näm-lich der Unterschied der Lichtreize etwa $^1/_2$ betragen, wenn ein Unterschied i der Empfindung wahrgenommen werden soll: lassen wir dies Verhältniss auch für den minimalen Lichtreiz im Vergleich mit der subjectiven Helligkeitsempfin-dung gelten, so würde letztere einer Helligkeit gleichzusetzen sein, welche ein weisses Papier hat, wenn es von der Hälfte der Lichtstärke des Planeten Venu beleuchtet wird. — Welchem Wechsel aber die Helligkeit der subjectiven Licht-empfindung bei grösserer objectiver Helligkeit unterliegt, darüber fehlen bishe Bestimmungen.

Meine Versuche hierüber wurden in folgender Weise angestellt: ich befand mich in einem finsteren Zimmer vor einem Schirm von weissem Papier und s nahe an demselben, dass das ganze Gesichtsfeld von ihm ausgefüllt war. De Schirm war 5 Meter entfernt von einer kleinen Diaphragma-Oeffnung im Laden

es Fensters, welche als Lichtquelle für den Schirm diente. Betrug die Oeffnung es Diaphragmas 1 Mm., so konnte ich in dem Momente, wo die Oeffnung des iaphragmas verdeckt und wo sie frei wurde, eine Veränderung in der Helligkeit es Gesichtsfeldes bemerken.

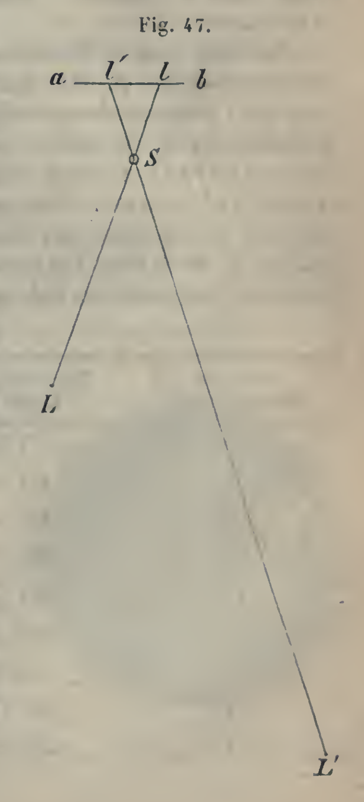
Nach LITTROW (Wunder des Himmels 1837, p. 298) giebt Venus zur Zeit res höchsten Glanzes einen unter günstigen Umständen eben noch erkennbaren chatten. Venus ist dann eine sichelförmige Fläche von 40 Bogensecunden Länge nd 10″ Breite. 1 Mm. in 5 Meter Entfernung entspricht 41 Bogensecunden Seite.

Ferner zeigte sich in anderen Versuchen, dass ein Schatten auf weissem apier bei geringster absoluter Helligkeit unterschieden werden konnte, wenn die elligkeit des Schattens halb so gross war, als die des Grundes, also die Unterhiedsempfindlichkeit $= 1/2$, wie aus dem folgenden § 25 hervorgehen wird. f. Physiologie der Netzhaut p. 25—49.)

§ 25. Empfindung von Helligkeitsunterschieden. — Wir können elligkeitsdifferenzen unterscheiden, welche nach einander unsere Sehsubstanz ficiren, und Helligkeitsdifferenzen, welche gleichzeitig neben einander empfunn werden. Ueber die ersteren liegen keine methodischen Untersuchungen vor, usser in Bezug auf indirectes Sehen (§ 27) und in Bezug auf binoculares Sehen 29).

Untersuchungen über gleichzeitige Empfindung von Helligkeitsunterschieden heint zuerst BOUGUER (Optice de diversis luminis gradibus dimetiendis editum a de La Caille c. Viennae 1762 [französische Ausgabe von 1760] 25. Sectio II. Articulus I.) angestellt zu haben, dem er vor eine weisse Tafel einen Stab stellte nd von zwei Kerzen in verschiedener Entfernung chatten auf die Tafel werfen liess. War die eine erze 8 Mal so weit von der Tafel entfernt, als die ndere, so konnte er den von der entfernteren erze geworfenen Schatten nicht mehr wahrhmen, und fügt hinzu: *Quantum ego quidem nimadverti, magna luminis claritas rationem non mutabat, modo ne oculis vis inferatur.* Dertige Versuche scheint erst VOLKMANN auf FECHNER's unsch (Psychophysik I. p. 150) wieder angestellt haben in gleicher Weise, wie BOUGUER.

Fig. 47.



Befindet sich in Figur 47 vor einer weissen afel ab ein Stab S und sind L und L' gleichässig brennende und leuchtende Kerzen, so wern auf die Tafel zwei Schatten, ein stärkerer l n der näheren und ein schwächerer l' von der tfernteren Flamme geworfen. Der schwächere chatten, welcher allein in Betracht kommt, wird leuchtet von der näheren Flamme, der schattense Grund der Tafel wird beleuchtet von beiden ammen: es ist die Aufgabe, den schwächeren

Schatten durch Entfernung der Flamme so schwach zu machen, dass er nur ebe
noch von dem Grunde der Tafel unterschieden werden kann. Bezeichnet ma
die Intensität der Beleuchtung von L mit $J = \frac{1}{L l^2}$, der von L' mit $J' = \frac{1}{L' l}$
(Figur 47), so ist die Helligkeit des unbeschatteten Grundes der Tafel $= J + J$
die Helligkeit des schwächeren Schattens $= J$ und das Verhältniss der beide
Helligkeiten zu einander in Bezug auf J ist $= \frac{J + J'}{J}$, und die Differenz de
selben, mit Beziehung auf die Grösse J bestimmt, $= \frac{J'}{J}$. Diesen Werth h
Bouguer $= \frac{1}{64}$, Volkmann $= \frac{1}{100}$ gefunden, indem sie die Intensität der schwäch
beleuchtenden Flamme $= 1$ setzen.

Hat man bei Anstellung der Versuche dafür Sorge getragen, dass die beide
Flammen gleich und gleichmässig leuchten, dass der Beobachter nicht geblend
wird, dass durch die Zerstreuung des Lichtes im Zimmer nicht störende Refle
auf die Tafel fallen, so giebt man der näheren Kerze eine bestimmte Stellung un
Entfernung von der Tafel und lässt durch einen Gehülfen die zweite Kerze s
weit entfernen, bis der von ihr geworfene Schatten nur eben noch sichtbar is
und bei noch weiterer Entfernung ganz verschwindet. Indem man diese Grenz
der Sichtbarkeit durch wiederholtes, abwechselndes Nähern und Entfernen d
Kerze bestimmt, kommt man bald zu einer gewissen Sicherheit und zu überei
stimmenden Resultaten in Bezug auf die Entfernung, welche der Kerzenflamm
zu geben ist.

Ich habe nun im Widerspruch mit Bouguer und Volkmann gefunden (Physio
logie der Netzhaut p. 56), dass die Fähigkeit, Lichtdifferenzen zu unterscheide
oder die Unterschiedsempfindlichkeit (Fechner) abhängig ist von der absolut
Helligkeit der Beleuchtung, und zwar, dass mit der Abnahme der abso
luten Helligkeit auch die Empfindlichkeit für Helligkeitsunte
schiede abnimmt. Dies ergiebt sich aus der folgenden Tabelle, für welc
nur noch zu bemerken ist, dass die Intensität der Beleuchtung durch eine Kerze
flamme in 2000 Mm. Entfernung $= 1$ gesetzt und darauf die absoluten Inte
sitäten der Beleuchtung reducirt sind, welche der näheren Kerze zukam.

Tabelle XI.

Absolute Helligkeiten.	Entfernung der Kerze L.	Entfernung der Kerze L'.	Unterschieds-empfindlichkeit.
710	75 Mm.	960 Mm.	$\frac{1}{164}$
173	150 -	1770 -	$\frac{1}{140}$
100	200 -	2220 -	$\frac{1}{123}$
44	300 -	3090 -	$\frac{1}{106}$
25	400 -	4085 -	$\frac{1}{104}$
16	500 -	4850 -	$\frac{1}{94}$
7	750 -	7150 -	$\frac{1}{90}$
4	1000 -	8200 -	$\frac{1}{67}$
1	2000 -	11870 -	$\frac{1}{35}$

Bei weiterer Abnahme der absoluten Helligkeit wird die Unterschiedsempfind-ichkeit immer geringer. Statt der Kerzen wendete ich in anderen Versuchs-eihen zur Beleuchtung der Tafel Diaphragma-Oeffnungen im Laden des finstern immers an, wie sie Figur 48 zeigt, welche sich hinter einer mattgeschliffenen

Fig. 48.



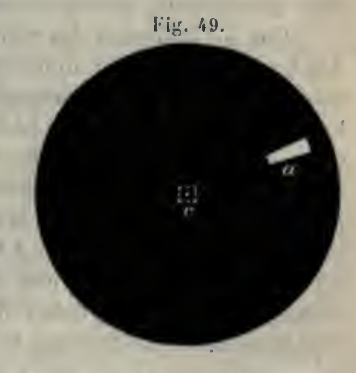
lastafel befinden und beliebig vergrössert und verkleinert werden können. Eine eduction auf die Helligkeit von den benutzten Kerzenflammen ist leicht ausführ-ar durch photometrische Bestimmung. Setzen wir mit Rücksicht auf die Ver-ichsverhältnisse die Intensität einer Kerzenflamme in 2000 Mm. Entfernung von erTafel = 13656, statt 1 in Tabelle IX, so erhalten wir folgende Unterschieds-npfindlichkeiten d bei Abnahme der Lichtintensitäten J:

$$J = 13656 - 5625 - 1306 - 56 - 5$$
$$d = {}^{1}/_{39} - {}^{1}/_{30} - {}^{1}/_{27} - {}^{1}/_{11} - {}^{1}/_{3}$$

Vegen des Näheren verweise ich auf meine Physiologie der Netzhaut p. 52 u. f.

Eine zweite Methode, die Wahrnehmbarkeit von Helligkeitsunterschieden zu estimmen, beruht auf der Vermischung von Schwarz und Weiss durch raschen Vechsel der Eindrücke: Auf einer schwarzen Scheibe, welche in schnelle Rota-on gesetzt werden kann, befindet sich ein weisser Sectorabschnitt, wie in igur 49; bei Rotation der Scheibe erscheint dann n grauer Kranz auf derselben, welcher heller t, als der Grund der Scheibe. Diese Scheiben erden Masson'sche Scheiben genannt, da Masson Études de photométrie électrique in Annales de himie et de Physique 1845, 3me ser. T. XIV. . 129, im Auszuge bei Fechner, Psychophysik I. . 152) sie zuerst angewendet hat. Kennt man as Verhältniss der Helligkeit des schwarzen zu em weissen Papier, so kann man daraus die elligkeitsdifferenz zwischen dem Grunde der cheibe und dem Kranze berechnen. Theils zur ervorbringung verschiedener absoluter Hellig-eiten der Scheibe, theils zur Variation des Helligkeitsverhältnisses zwischen

Fig. 49.



Kranz und Grund habe ich nach dem Vorgange von MAXWELL bei farbigen Scheiben zur Farbenmischung (Transactions of the Royal Society of Edinburgh XXI. 1857 p. 275) einen radiären Schlitz an einer weissen und an einer schwarzen Scheibe angebracht (Figur 50ª) und dieselben so durch einander gesteckt, wie es Figur 50 zeigt. Die Helligkeit des Grundes der Scheibe ist, wenn wir die Helligkeit des Weiss mit W, die des Schwarz mit S bezeichnen, $= (360^0 - x^0)\ W + x^0\ S$

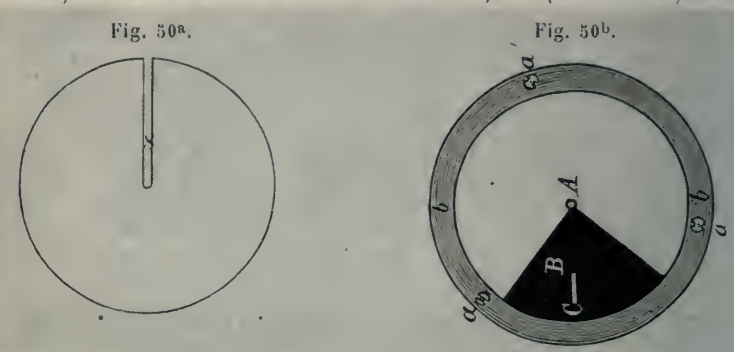


Fig. 50ª. Fig. 50ᵇ.

und die Helligkeit des Kranzes, wenn a die Anzahl der Grade des Sectorabschnittes C bezeichnet und der Sector weiss auf schwarzer Scheibe ist $= (360^0 - x^0 + a^0)\ W + (x^0 - a^0)\ S$; das Verhältniss der Helligkeiten zwischen Kranz und Grund ist also

$$\frac{J + J'}{J} = \frac{(x^0 - a^0)\ S + (360^0 - x^0 + a^0)\ W}{(360^0 - x^0)\ W + x^0\ S}$$

und die Differenz der beiden Helligkeiten, bezogen auf die Helligkeit des Grundes also

$$\frac{J'}{J} = \frac{(x^0 - a^0)\ S + (360^0 - x^0 + a^0)\ W - (360^0 - x^0)\ W + x^0\ S}{(360^0 - x^0)\ W + x^0\ S}$$

$$= \frac{a^0\ W - a^0\ S}{x^0\ S + (360^0 - x^0)\ W}.$$

Die Differenz der Helligkeiten ist so lange zu variiren, bis der Kranz eben noch gesehen werden kann. Durch Vorschieben der weissen Scheibe kann x durch Anbringen von Sectoren verschiedener Grösse auf der schwarzen Scheibe a willkürlich verändert werden.

Eine Variation der absoluten Helligkeit der Scheibe ist also gegeben 1) durch verschiedene Mischungsverhältnisse von Schwarz und Weiss, 2) durch verschiedene Beleuchtung der rotirenden Scheiben.

Um die Helligkeit des Schwarz mit der Helligkeit des Weiss vergleichen und das Verhältniss beider numerisch ausdrücken zu können, verfuhr ich folgendermassen: auf einem schwarzen Grunde ab Figur 51 ist eine weisse Scheibe W befestigt, welche von dem Lichte L beleuchtet wird; eine entsprechend kleinere schwarze Scheibe S, welche dem Lichte genähert und von ihm entfernt werden kann, wird so lange verschoben, bis ihr auf den schwarzen Hintergrund projicirtes Bild S' eben so hell erscheint, wie die schwarze Scheibe, wenn das Auge sich neben dem Lichte in A befindet und für die Entfernung des Hintergrundes ab accommodirt ist. W und S' erscheinen also gleich hell, W ist aber von L weiter entfernt als S, daher die Beleuchtung von S intensiver ist und zwar um das Quadrat der Entfernung WL, dividirt durch das Quadrat der Entfernung SL, oder die Helligkeit von S ist $= \frac{WL^2}{LS^2}$. War $WL = 5700$ Mm., so fand ich

$LS = 750$ Mm. Die Beleuchtung von S war also $(7,6)^2 = 57$ Mal intensiver, als die von W, oder da beide Scheiben gleich hell erschienen, würde die weisse Scheibe 57 Mal heller sein müssen, als die schwarze Scheibe. Setzen wir die

Fig. 51.



Helligkeit der schwarzen Scheibe $S = 1$, so ist $W = 57\ S$ und $S = \frac{1}{57}\ W$.

Setzen wir diese Werthe in die obige Formel, so erhalten wir

$$\frac{J'}{J} = \frac{57\,a^0 - a^0}{x^0 + 57\,(360^0 - x^0)}$$

für die Differenz der Helligkeiten von Grund und Kranz der Scheiben, und damit die Unterschiedsempfindlichkeit, wenn a und x bestimmte Zahlenwerthe, die sich durch Ablesen der Grade finden.

Auch bei Anwendung dieser Methode findet sich, dass bei geringerer Helligkeit der Scheiben die Unterschiedsempfindlichkeit kleiner ist, und zwar erstens, wenn die Beleuchtung durch diffuses Tageslicht schwächer ist, zweitens, wenn die Helligkeit durch Beimischung von viel Schwarz auf der Scheibe selbst geringer ist. Auf der folgenden Tabelle XII gebe ich eine Zusammenstellung derartiger Versuchsreihen, die erste bei trübem, die zweite bei hellem Himmel, die dritte bei directer Sonnenbeleuchtung der Scheiben gewonnen.

Tabelle XII.

Sectorabschnitt.	I. Grauer Himmel.		II. Heller Himmel.		III. Sonnenschein.	
a	$(360^0 - x^0)\ W$	$\frac{J'}{J}$	$(360^0 - x^0)\ W$	$\frac{J'}{J}$	$(360^0 - x^0)\ W$	$\frac{J'}{J}$
$1/2^0$	54^0	$\frac{1}{121}$	73^0	$\frac{1}{158}$	70^0	$\frac{1}{153}$
1^0	145^0	$\frac{1}{151}$	180^0	$\frac{1}{186}$	140^0	$\frac{1}{146}$
$1\,1/2^0$	235^0	$\frac{1}{160}$	230^0	$\frac{1}{158}$	195^0	$\frac{1}{134}$
2^0	325^0	$\frac{1}{166}$	300^0	$\frac{1}{153}$	225^0	$\frac{1}{116}$
$2\,1/2^0$	—	—	—	—	250^0	$\frac{1}{102}$

Das Maximum der Unterschiedsempfindlichkeit wurde hier erreicht bei hellem diffusem Tageslichte, wenn ungefähr halb Schwarz und halb Weiss auf der Scheibe gemischt war, und beträgt $\frac{1}{186}$; war mehr Schwarz in der Mischung, die Scheibe also dunkler, so wurde die Unterschiedsempfindlichkeit geringer gefunden; ebenso nahm die Unterschiedsempfindlichkeit bei geringerer Helligkeit des diffusen Tageslichtes immer etwas ab, wie ein Vergleich der ersten und zweiten Reihe zeigt und was noch viel eclatanter hervortrat, wenn bei beschränktem Zutritt von Tageslicht Bestimmungen gemacht wurden. — Soweit sind die Versuche mit den Masson'schen Scheiben in Uebereinstimmung mit den Schattenversuchen.

Dagegen zeigt sich etwas neues: dass, wenn die Scheiben bei heller Tagesbeleuchtung in II weniger als die Hälfte Schwarz enthalten, auch wieder eine Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit eintritt. Diese Abnahme wird nun viel auffallender, wenn man die rotirenden Scheiben mit directem Sonnenlichte, wie in der Reihe III, beleuchtet; auch wird hier mit zunehmender Helligkeit der Scheibe in Folge der Zumischung von mehr Weiss die Unterschiedsempfindlichkeit immer geringer.

Das Maximum der Unterschiedsempfindlichkeit würde also etwa bei der Helligkeit des diffusen Tageslichtes erreicht werden und Helligkeiten unterschieden werden können, welche nur um $\frac{1}{186}$ von einander differiren; bei geringerer und bei grösserer Helligkeit dagegen eine Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit eintreten.

Aehnliche Resultate hat Helmholtz erhalten nach einer ähnlichen Versuchsmethode und giebt als Maximum $\frac{1}{167}$ an hellen Sommertagen an, bei directer Sonnenbeleuchtung $\frac{1}{150}$. (Helmholtz, Physiol. Optik p. 315.)

Mit diesen Resultaten sind auch die Erfahrungen des alltäglichen Lebens in Harmonie: wenn wir sehen wollen, ob Papier, Wäsche und dergleichen gleichmässig weiss sind, so bringen wir sie dicht ans Fenster, indem wir voraussetzen, dass etwaige Flecke besser unterschieden werden können bei grösserer als bei geringerer Helligkeit; wir lassen aber zu dieser Prüfung nicht die Sonne auf das Object scheinen, sondern vermeiden dabei geflissentlich die directe Sonnenbeleuchtung.

Bezüglich der genaueren Versuchs- und Literaturangaben verweise ich auf meine Physiologie der Netzhaut Cap. III und Fechner's Psychophysik.

§ 26. Empfindung von Helligkeitsunterschieden unter verschieden grossem Gesichtswinkel. — Die bisher besprochenen Versuche über die Empfindung von Helligkeitsunterschieden sind immer unter ungefähr gleichem Gesichtswinkel, nämlich in einer Entfernung des Beobachters von der Scheibe gleich 200 Mm. bis 300 Mm., angestellt worden. Erfahrungen des alltäglichen Lebens lehren aber, dass bei grossem Gesichtswinkel oder grosser Nähe des Objectes noch geringe Helligkeitsunterschiede bemerkt werden können, welche bei grösserer Entfernung des Objectes der Wahrnehmung entgehen.

Förster hat daher den Satz aufgestellt: »Helligkeit und Gesichtswinkel ergänzen einander.« (Hemeralopie etc. Breslau 1857, p. 1.) Nun hat aber schon Smith (Lehrbegriff der Optik von Robert Smith, übersetzt von Kästner 1755, p. 25) nachgewiesen, dass die Helligkeit des auf der Netzhaut entworfenen Bildes bei allen Entfernungen des Objectes vom Auge ein und dieselbe bleibt, ein Satz, welcher, wie auch J. Herschel (Vom Lichte p. 18) und Arago (Astronomie I. p. 139 und 186) auseinandergesetzt haben, für alle Objecte mit merkbarem Durchmesser, d. h. von Flächen, dagegen nicht von Punkten gilt.

Werden also die rotirenden Scheiben bei constanter absoluter Helligkeit aus verschiedenen Entfernungen beobachtet und die Helligkeitsunterschiede bestimmt, welche für die Wahrnehmbarkeit des Kranzes auf der Scheibe erforderlich sind, so ergiebt sich, dass bei zunehmender Entfernung des Beobachters von der Scheibe, d. h. also bei Abnahme des Gesichtswinkels für das Object der Helligkeitsunterschied grösser werden muss, wenn derselbe empfunden werden soll.

Für weisse Scheiben mit schwarzen Sectorabschnitten, welche nicht sehr stark, nämlich durch eine Stearinkerzenflamme in 2300 Mm. Entfernung von der Scheibe beleuchtet wurden, ergaben sich für verschiedene Entfernungen des Beobachters, also verschiedene Gesichtswinkel (die Grösse des Objectes dividirt durch die Grösse der Entfernung gleich der Tangente des Gesichtswinkels, und die Breite des Kranzes als Object = 25 Mm.) folgende Unterschiedsempfindlichkeiten:

Tabelle XIII *A*.

Entfernung.	Gesichtswinkel.	Unterschiedsempfindlichkeit.
200 Mm.	7°	$\frac{1}{72}$
2000 -	0° 43′	$\frac{1}{35}$
5000 -	0° 17′ 10″	$\frac{1}{23}$
13500 -	0° 6′ 22″	$\frac{1}{11}$

Wurde die absolute Helligkeit dadurch vermindert, dass statt der weissen Scheibe eine schwarze, also 57 Mal dunklere Scheibe genommen wurde, so sank die Unterschiedsempfindlichkeit sehr bedeutend und zwar in folgender Weise:

Tabelle XIII *B*.

Entfernung.	Gesichtswinkel.	Unterschiedsempfindlichkeit.
200 Mm.	7°	$\frac{1}{7}$
4000 -	0° 21′ 30″	$\frac{1}{1,3}$
6250 -	0° 13′ 47″	1,555
8750 -	0° 9′ 50″	3,111
13500 -	0° 6′ 22″	9,3

Bei der grössten Entfernung musste also der Kranz 9 Mal so hell sein, als der Grund der Scheibe, um gesehen werden zu können.

Der Einfluss des Gesichtswinkels oder der scheinbaren Grösse des Objectes macht sich also in sehr auffallender Weise geltend, und zwar bald in geringerem, bald in höherem Grade als die absolute Helligkeit: denn bei einer um das 57fache verminderten Helligkeit nimmt die Unterschiedsempfindlichkeit um das 10fache $\left(\text{von } \frac{1}{72} \text{ bis } \frac{1}{7}\right)$ ab, bei Abnahme des Gesichtswinkels um ungefähr das 60fache (von 7° bis 6′ 22″) aber nimmt sie nur um etwa das 6fache (Tabelle XI *A* von $\frac{1}{72}$ bis $\left.\frac{1}{11}\right)$, bei geringer absoluter Helligkeit aber um das 65fache (7 × 9,3 in Tabelle XI *B*) ab.

Die Wahrnehmbarkeit eines Helligkeitsunterschiedes, oder wie man gewöhnlich sagt, die Sichtbarkeit eines Objectes ist also abhängig: 1) von der Grösse des Helligkeitsunterschiedes, 2) von der absoluten Helligkeit der Objecte, 3) von dem Gesichtswinkel derselben.

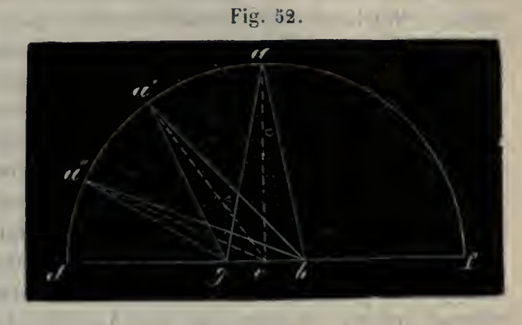
Es ergiebt sich hieraus ferner, dass die einzelnen Empfindungselemente der Netzhaut oder des Sehorgans keineswegs so von einander isolirt sein können, dass sie unabhängig von einander wären: denn wenn eine Erregung, welche ein einzelnes Netzhautelement trifft, nicht genügt, um eine Empfindung auszulösen, wohl aber, wenn eine Anzahl von Netzhautelementen getroffen wird, so werden wir uns vorstellen müssen, dass die Netzhautelemente einander unterstützen oder zusammenwirken, und die Summe ihrer einzelnen Erregungen zur Erregung einer Empfindung die erforderliche Grösse hat, während die einzelne Erregung zu klein ist. — Auch die Thatsache, dass eine Empfindung der Helligkeitsunterschiede bestimmte Grenzen hat, welche durch die Grösse der beiden Helligkeiten gesetzt werden, fordert die Annahme einer gegenseitigen Beeinflussung der Sehelemente, deren isolirte Erregbarkeit anderseits auch feststeht. Wir werden darauf in § 28 zurückzukommen haben.

Was weiter den Einfluss der absoluten Helligkeit auf die Unterschiedsempfindlichkeit betrifft, so ist derselbe sehr wunderbar und unerklärlich: wir würden von vornherein viel eher erwarten, dass bei gleichbleibendem Unterschiede der Helligkeiten auch der Unterschied der Empfindung gleichbliebe unabhängig von der Grösse der absoluten Helligkeit — ein Satz, welchen Fechner als psychophysisches Gesetz aufgestellt hat, mit welchem aber die obigen Versuchsresultate im Widerspruche sind. Der Einfluss der subjectiven Lichtempfindung, des Augenschwarz, welchen Fechner zur Erklärung der dem Gesetze widersprechenden Versuche herbeizieht, ist wohl zu gering, um die Erscheinungen der Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit bei Abnahme der absoluten Helligkeit zu erklären — indess scheint die Hering'sche Theorie (Zum Lichtsinn l. c. V. Mitth. § 28—30) geeignet, einen Ausgangspunkt für eine einstige Erklärung zu bieten. Nach Hering's Auffassung würde bei Abnahme der absoluten Helligkeit sich das Verhältniss des Assimilationsprocesses zu dem Dissimilationsprocesse voraussichtlich ändern, aber nicht proportional der Grösse der Reizverminderung, sondern in einem complicirteren Verhältnisse, indem die Dissimilation um x abnimmt, die Assimilation um y zunimmt für die eine der beiden Helligkeiten, für die andere Helligkeit aber die Dissimilation um ξ ab-, die Assimilation um v zunimmt. Die

Processe in der Sehsubstanz würden also nicht correlat sein den Veränderungen der Reizgrössen.

§ 27. Die Lichtempfindung in der Ausbreitung der Netzhaut (beim indirecten Sehen). — Wenn ein leuchtender Punkt nicht in der Sehaxe oder Gesichtslinie gelegen ist, sondern um eine Anzahl Grade von derselben entfernt, so muss der durch die Pupille in das Auge einfallende Lichtkegel einen um so kleineren Querschnitt haben, je grösser der Winkel ist, welchen die Axe des Lichtkegels mit der Gesichtslinie bildet. Ist in Figur 52 gb der Durchmesser der Pupille,

Fig. 52.



und sind a, a', a'' leuchtende Punkte, so wird für a die Pupillarfläche zugleich die Basis des Lichtkegels agb sein, für a' aber wird ein zur Axe verticaler Querschnitt eine kleinere Fläche haben, als die Pupillarfläche, und für a'' wird die Fläche noch kleiner werden. Da aber mit der Abnahme der Kegelbasis die Lichtmenge abnimmt, welche zur Netzhaut gelangt, so werden die von der *Fovea centralis* entfernteren Zonen der Netzhaut weniger Licht bekommen, als die Fovea. Das Sehen mit den peripherischen Theilen der Netzhaut bezeichnet man als indirectes Sehen (Purkinje, Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens II. 1825, p. 1), indem man den Blick nicht auf die gesehenen Objecte dirigirt, oder auch als *Visio obliqua* — wir würden also erwarten können, dass uns die indirect gesehenen Objecte dunkler erscheinen als die direct gesehenen. Das ist nach meinen Versuchen nicht der Fall, vielmehr bietet der Lichtsinn in der ganzen Ausbreitung der Netzhaut keine irgend erheblichen Verschiedenheiten dar. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass der Adaptationszustand der Netzhaut in ihrer ganzen Ausdehnung der gleiche sei. Man muss weiter erwägen, dass, wenn auch die Lichtintensität des Netzhautbildes nach der Peripherie, der *Ora serrata* hin immer geringer wird, der verminderten Lichtmenge auch die Adaptation der peripherischen Netzhautzonen entsprechen wird, da ja diese Zonen zeitlebens entsprechend schwächere Lichteindrücke bekommen haben, als die Centralstelle. Die Adaptation der Netzhaut wird also überall entsprechend sein der ihr zukommenden Lichtstärke.

Beobachtet man ein Object, z. B. ein Quadratcentimeter weisses Papier in der Weise, dass man abwechselnd dasselbe eine bestimmte Zeit lang fixirt, dann einen 25° davon nach oben, unten, rechts oder links gelegenen Punkt ebenso lange fixirt und dabei dem indirect unter 25° gesehenen Papierquadrat die Aufmerksamkeit zuwendet, so bemerkt man im Ganzen nur äusserst geringe Helligkeitsdifferenzen, und zwar in dem Sinne, dass das Centrum der Netzhaut das Object etwas heller empfindet, als die peripherischen Theile. Das Nähere siehe bei Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 92.

Von Seiten der Astronomen ist nun aber gerade umgekehrt behauptet worden, dass die Peripherie der Netzhaut für sehr schwache Lichteindrücke empfindlicher

sei, als das Centrum, und es ist in der That Praxis bei ihnen, sehr lichtschwacl Sterne, wie z. B. die Trabanten des Uranus, so zu beobachten, dass sie an ihn vorbeisehen, wie Arago (Astronomie I. p. 189) sagt: *que pour apercevoir u object très-peu lumineux, il faut ne pas le regarder.* Ich habe als wahrscheinli hingestellt, dass das bessere Sehen sehr lichtschwacher Sterne auf den periph rischen Netzhautzonen darauf beruht, dass die peripherischen Theile sich b astronomischen Beobachtungen in einem Adaptationszustande für grössere Dunke heit befinden, da die peripherischen Theile von den Wandungen des Telesco fast gar kein Licht bekommen, die mehr central gelegenen Theile aber das helle Gesichtsfeld des Telescops als Bild auffangen. So betrug bei d'Arrest (Rueti Explicatio facti, quod minimae paullum lucentes stellae tantum peripheria retin cerni possunt. Programma Lipsiae 1859) der Winkelabstand vom Centrum, unt welchem ein lichtschwacher Stern am deutlichsten erschien, einmal 11°, ei ander Mal 13° 2′ — über die Grösse des Sehfeldes ist aber nichts gesagt. — Ein wie grosse Rolle aber die Adaptation der Netzhaut beim Beobachten lichtschwach Sterne spielt, ergiebt sich aus Arago's (Astronomie I. p. 144) Mittheilunge wonach W. Herschel nach dem Durchgange eines Sternes zweiter Grösse dur das Gesichtsfeld des Telescops 20 Minuten bedurfte zum Ausruhen der Netzha (*pour que l'oeil reprit sa tranquillité*) und die schwächsten Trabanten des Uran konnte der jüngere Herschel erst wahrnehmen, nachdem er eine Viertelstun lang das Auge am Ocular gehabt und sorgfältig die Einwirkung jedes ander Lichtes vermieden hatte. — Mir scheint nach alledem die Annahme nicht gerech fertigt, dass die peripherischen Netzhautzonen an sich empfindlicher für schwac Lichteindrücke seien, als die centralen. — Ueber die hier gegebene Erklärung d Erkennens der Sterne beim indirecten Sehen vergleiche man indess die Beobac tungen von Hensen (Archiv für pathologische Anatomie Bd. 39, 1867, p. 480 welcher die Erscheinung aus einem lückenhaften Sehen der *Fovea centralis* erklär

§ 28. Einfluss der Lichtempfindung an einer Netzhautstell auf die Lichtempfindung an anderen Netzhautstellen. (Contras und Induction.) — Die Thatsache, dass ein dunkelgraues Object auf weisse Grunde dunkler erscheint, als auf schwarzem Grunde, dass ein sehr intensiv Licht, welches plötzlich erscheint, helle Objecte, die es nicht beleuchtet, z. Lichtflammen sofort viel dunkler erscheinen lässt, diese und ähnliche Thatsach (s. Fechner, Ueber die Contrastempfindung in Berichte der Gesellschaft d Wissenschaften zu Leipzig 1860, p. 71, — Helmholtz, Physiol. Optik p. 411, — Aubert, Physiol. der Netzhaut p. 381) sind theils als eine Veränderung unser Empfindung, theils als eine Veränderung unseres Urtheils angesehen worden. wird zu untersuchen sein, ob es Kriterien für die eine oder andere Auffassu giebt, oder, da das Urtheil als höhere Instanz erst herbeigezogen werden da wenn aus der Empfindung die Erscheinungen nicht erklärt werden können, wir Beobachtungen hierüber machen können, in welchen das Urtheil als ausg schlossen angesehen werden muss. In § 26 haben wir schon gefunden, dass d Empfindung von Helligkeitsunterschieden zu der Annahme drängt, dass d empfindenden Elemente nicht völlig isolirt von einander sind, sondern sich gege seitig beeinflussen. Ich habe ferner gefunden (Moleschott's Untersuchung Bd. V. p. 287), dass beim Ueberspringen des elektrischen Funkens in eine

nicht vollständig dunklen Zimmer alle matt sichtbaren Objecte sogleich unsichtbar werden und das Gesichtsfeld tief dunkel erscheint, und aus dieser Erscheinung auf eine Mitbetheiligung der ganzen übrigen, nicht von dem elektrischen Funken erregten Netzhaut geschlossen. Bei meinen Adaptationsversuchen habe ich Aehnliches gefunden: sämmtliche subjective Lichterscheinungen in dem Gesichtsfelde verschwanden nämlich, wenn der Platindraht leuchtend gesehen wurde, oder wenn ich den Platinschwamm einer Döbereiner'schen Zündmaschine erglühen liess. (Physiol. der Netzhaut p. 334.) Da hier die durch den sehr schwachen objectiven Lichtreiz hervorgebrachte Erregung sehr gering, die subjective Lichtproduction aber meistens sehr lebhaft ist, so ergiebt sich, dass sehr schwache, auf eine kleine Stelle der Netzhaut beschränkte Reize eine Umstimmung der Empfindung in der übrigen Netzhaut bewirken, wobei offenbar jeder Einfluss von Urtheil, Vorstellung u. s. w. ausgeschlossen ist. Seitdem hat Mach (Archiv von Reichert und Dubois-Reymond 1865, p. 629, Wiener Akademie-Berichte 1866, Bd. 52, p. 303, Bd. 54, II. p. 131 und p. 393, 1868, Bd. 57, II. p. 11, Vierteljahrsschrift für Psychiatrie 1868) Beobachtungen mitgetheilt, aus welchen er schliesst, dass die Lichtempfindung an einer Stelle der Netzhaut beeinflusst wird durch die Lichtempfindung benachbarter Netzhautstellen, ohne dass dabei eine Betheiligung des Urtheils angenommen werden kann. Wird eine Scheibe mit der Zeichnung Figur 53 in schnelle Rotation gesetzt, so zeigt sich nicht eine der Mischung des Schwarz und Weiss entsprechende Abnahme der Helligkeit von der Peripherie nach dem Centrum (nach Massgabe des Talbot-Plateau'schen Gesetzes § 33), sondern es erscheinen dunklere Ringe an den Knickungen und Spitzen der weissen Sectoren. Desgleichen erscheinen, wenn man ein negatives Bild von der Scheibe anfertigt, in welchem das Weiss ist, was in Figur 53 Schwarz ist und umgekehrt, an den Knickungen und Spitzen hellere Ringe, oder an rotirenden Cylindern mit entsprechender Zeichnung. Ferner hat Mach Zeichnungen entworfen, in denen ein helleres gleichmässiges Grau an ein an Helligkeit allmälig und gleichmässig abnehmendes Grau grenzt, bei welchem ein heller, durch nichts Objectives motivirter Streifen oder Grenzschein auftritt. Umgekehrt erscheint ein dunklerer Grenzschein, wenn das eine Grau allmälig an Helligkeit abnimmt.

Fig. 53.



Bei allen diesen Contrasterscheinungen ist eine Beeinflussung des Urtheils als Erklärungsgrund nicht nachweislich, wir können nicht angeben, was uns dazu bestimmen soll, die hellen oder dunkeln Grenzscheine in den Mach'schen

Versuchen auf Grund einer unrichtigen Beurtheilung der Helligkeitsverhältnis
zu sehen, oder in den von mir angegebenen Beobachtungen die subjectiven un
die objectiven Erscheinungen nicht mehr zu sehen. Wenn man eine Veränderun
der Empfindung, also eine Beeinflussung der Netzhaut durch die Erregung be
nachbarter Netzhauttheile annimmt, so finden darin sowohl die Contrasterschei
nungen, als die Erfahrung, dass die räumliche Ausdehnung eines Lichtreizes a
der Netzhaut massgebend ist für seine Wahrnehmbarkeit, ihre Erklärung — un
die anatomischen Verhältnisse der Netzhaut fordern durchaus nicht die Annahm
einer vollständigen Isolirung der empfindenden Elemente, sondern sprechen, wi
Mach (Bd. 52, p. 317) hervorhebt, vielmehr für einen anatomischen Zusammen
hang derselben. Wir sind also nicht nur methodisch darauf gewiesen, die höher
Instanz des Urtheils erst herbeizuziehen, wenn die physiologische Erklärung un
möglich wird, sondern wir finden, dass eine Urtheilstäuschung gar keinen An
halt für die Erklärung oder auch nur die Aneinanderreihung der Erscheinunge
bietet. Unter die Annahme, dass eine Wechselwirkung benachbarte
Netzhautstellen auf einander besteht, lassen sich aber in der That all
Contrasterscheinungen im Gebiete des Licht- und Farbensinnes nebst vielen an
deren Erfahrungen subsumiren — ohne dass damit die Forderung der isolirte
Leitung beeinträchtigt wird. Diese schon von Plateau (Poggendorff's Annale
1834, Bd. 32, p. 543) aufgestellte Hypothese ist theils durch Fechner (Contrast
empfindung l. c.) vielfach unterstützt, besonders aber von Hering (Wiener Aka
demie-Berichte 1872 Bd. 66, III., 1873 Bd. 68, III., 1874 Bd. 69, III.) durc
viele neue Versuche festgestellt worden. Ausserdem wird diese Hypothese ge
fordert durch die Verbindung der sehr nahe verwandten Erscheinungen de
gleichzeitigen oder simultanen Contrastes und des successiven Con
trastes, sowie der simultanen und successiven Lichtinduction.

Unter Lichtinduction versteht Hering (l. c. § 15) entsprechend der Farben
induction Brücke's eine Erhellung im Gesichtsfelde, wenn wir ein helles Obje
betrachten und nennt sie simultan, wenn die Erhellung während des Betrachten
des Objectes auftritt, successiv, wenn sie im Nachbilde auftritt — unter Contra
versteht man dagegen eine Verdunkelung im Gesichtsfelde unter den angegebene
Umständen, und zwar unter simultanem Contraste die Verdunkelung währen
der Beobachtung, unter successivem Contraste die Verdunkelung im Nachbild
(cf. § 32.)

Hering betrachtet bei mässiger Beleuchtung mit beiden Augen unverrückten Blickes de
irgendwie bezeichneten Mittelpunkt einer kleinen Scheibe von weissem Papier auf weit ausg
dehntem dunkelm Grunde (schwarzem Sammet), schliesst dann die Augen und bedeckt sie
das dunkle Nachbild der weissen Scheibe ist dann von einem hellen Hofe — Lichthofe -
umgeben, dessen Helligkeit von dem Nachbildrande nach der Peripherie hin allmälig abnimm
Wird der Versuch so abgeändert, dass zwei Lichthöfe in einander greifen, so verstärken s
sich gegenseitig in ihrer Helligkeit — wenn man z. B. zwei weisse Quadrate in einer En
fernung von etwa 4 Mm. von einander auf schwarzen Sammet legt. Dass die Erscheinung d
Lichthofes nicht auf einer Veränderung der Empfindung, sondern auf einer falschen Beurthe
lung der Helligkeit beruhte, ist eine mindestens sehr gesuchte Annahme, welche man n
machen würde, wenn zwingende Gründe die Zulässigkeit der ersten Erklärung beseitigte
Gegen die Erklärung, dass der Lichthof auf einer Urtheilstäuschung beruhte, spricht nun ab
eine Umkehr des Versuches: beobachtet man nämlich das Nachbild, welches eine dunk
Scheibe auf hellem Grunde liefert, so fehlt ein dem Lichthofe entsprechender dunkler H

ch unter Umständen, unter denen das Nachbild sehr hell ist. Für die Beurtheilung der
lligkeitsverhältnisse scheint aber doch durch die Umkehrung des Versuches nichts geändert
sein.

Dass ein Streifen schwarzen Papiers auf schwarzem Sammet heller erscheint, als auf
issem Papier, würde auf eine Urtheilstäuschung geschoben werden können: dass zwei
iche Streifen schwarzen Papiers, von denen der eine auf der linken Seite des Gesichtsfeldes
f schwarzem Sammet, der andere auf der rechten Seite des Gesichtsfeldes auf weissem
pier liegt, gleichzeitig ohne Verrückung des Fixirpunktes, sehr ungleich an Helligkeit er-
heinen, würde sich kaum aus einer falschen Beurtheilung der Helligkeiten erklären lassen.
irt man nun aber bei dieser Anordnung des Versuchs einen zwischen den beiden Streifen
gebrachten Punkt eine halbe oder ganze Minute lang, so bemerkt man, dass die Hellig-
itsdifferenz der beiden schwarzen Streifen sehr bedeutend abnimmt.
trachtet man aber weiter bei geschlossenen und bedeckten Augen das Nachbild, so erscheint
r im Vorbilde verdunkelte Streifen sehr hell auf dunklem Grunde, und der im Vorbilde er-
llte Streifen sehr dunkel auf hellem Grunde, so dass die Helligkeitsdifferenz der
iden Streifen im Nachbilde wieder viel grösser ist, als im Vorbilde.
eiter zeigt sich nun aber bei den Phasen des Nachbildes, dass die Helligkeiten der
undhälften und der Streifen in wechselndem Sinne zu- und abnehmen,
d dass eine Phase eintritt, in welcher die Grundflächen gleiche Helligkeit, die beiden
eifen aber sowohl von einander, als von dem Grunde verschiedene Helligkeiten
gen, d. h. einen Contrast, welcher durch die Verschiedenheit des Grundes gar nicht mehr
tivirt wird.

Aus diesen von Hering (l. c. § 10) angegebenen Versuchen muss man mit Hering schliessen,
s die verschiedene Helligkeit der Streifennachbilder in einem verschiedenen Erregungs-
stande der entsprechenden Netzhautstellen ihren Grund haben müsse, und weiter: »dass im
rbilde die objectiv gleichen Streifen deshalb verschieden hell erscheinen, weil die beiden
sprechenden Netzhautstellen sich wirklich in verschiedener Erregung befinden.« Damit
denn die Annahme eines durch Urtheilstäuschung bewirkten Einflusses auf die Empfindungen
geschlossen.

Indem wir bezüglich anderer Versuche über Contrast und Lichtinduction auf
ring's Aufsätze verweisen, bemerken wir, dass ganz analoge Beobachtungen
ch im Gebiete des Farbensinnes von Plateau (Poggendorff's Ann. 1834) und
chner (ebendaselbst 1838) gemacht sind und die Hering'schen Versuche auch
das Farbige direct übersetzt werden können und ihre Geltung behalten, wenn
n statt Schwarz Grün, bezw. Blau, statt Weiss Roth, bezw. Gelb substituirt.
. § 43.)

§ 29. Binoculare Lichtempfindung. Fechner's paradoxer Ver-
ch. — Nach den Ermittelungen des vorigen Paragraph ist die Frage berechtigt,
die Lichtempfindung verschieden ist, wenn nur eine oder wenn beide Netz-
ute erregt werden? Schon Jurin (Smith-Kästner, Lehrbegriff der Optik 1755,
479) hat darüber Versuche angestellt, ob ein Object heller erscheint, wenn
mit beiden, als wenn es mit nur einem Auge gesehen wird, und ist zu dem
sultate gekommen, dass ein binocular gesehenes Object etwa um $^1/_{13}$ heller er-
heint, als monocular gesehen. Harris und Brewster (Das Stereoscop 1857,
49, daselbst ist citirt Harris, Optics p. 117) haben Jurin's Versuche bestätigt
d auch ich habe sie nach einer ganz anderen Versuchsmethode und neuerlich
ch nach Jurin's Methode richtig gefunden. Ebenso Valerius (Poggendorff's Ann.
873, Bd. 150, p. 17), welcher eine im Wesentlichen der sogleich zu beschreiben-

den Jurin'schen ähnliche, aber in Bezug auf die photometrische Bestimmung g nauere Methode befolgte. Seine Resultate zeigen keine vollkommene Constan die Differenz beträgt nicht über $^1/_{15}$ bei VALERIUS.

JURIN beleuchtet einen weissen Papierstreifen durch zwei in gewisser Entfernung stehen gleich helle Lichter, so dass die rechte Hälfte des Papierstreifens von beiden Kerzen, die lin Hälfte in Folge des Vorschiebens eines Schirmes nur von der einen Kerze beleuchtet wir Nun verdeckt er dem rechten Auge die hellere, von beiden Kerzen beleuchtete rechte Häl des Streifens mit einem Schirme und sieht also mit beiden Augen die dunklere Hälfte, m dem linken Auge die hellere Hälfte: die linke dunklere Hälfte, mit beiden Augen gesehen, e scheint ungefähr gleich hell, wie die rechte hellere Hälfte, mit dem linken Auge allein gesehe wenn das eine Licht etwa 3,4 Mal so weit entfernt ist als das andere, so dass die Helligkeit der helleren und der dunkleren Hälfte sich etwa wie 13 zu 12 verhalten, die mit einem Au gesehene also $^1/_{13}$ heller ist, als die mit beiden Augen gesehene.

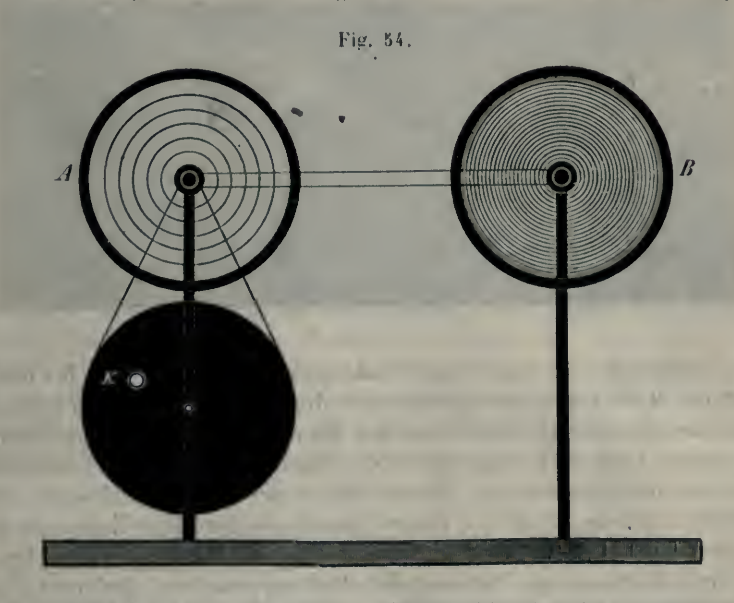
In Versuchen, welche FECHNER (Binoculares Sehen in Abhandlungen der Akademie Leipzig 1860, Bd. VII. p. 423) anstellen liess, wurde von den meisten Beobachtern bei Schliessen des einen Auges eine leichte Beschattung des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes m gleich darauf folgender Wiedererhellung gefunden, also die gleiche Helligkeit beim binoc laren, wie beim monocularen Sehen. In sogleich zu erwähnenden, nach FECHNER's Metho angestellten Versuchen glaube ich (Physiol. der Netzhaut p. 287) indess gefunden zu habe dass die Lichtintensität des Gesammtgesichtsfeldes etwas grösser ist, wenn beide Augen off sind, als wenn das eine geschlossen ist. Nur darf man keine sehr grosse Lichtintensität diesen Versuchen benutzen, sondern nur etwa die Helligkeit weissen Papiers bei diffuse Tageslichte im Zimmer.

Unter andern Umständen findet aber eine viel auffallendere Veränderu der Helligkeitsempfindung beim binocularen Sehen statt, und FECHNER hat fes gestellt, 1) dass, wenn man das Gesichtsfeld des einen Auges durch ein vo gehaltenes graues Glas verdunkelt und dann das gemeinschaftliche Gesichtsfe oder ein weisses Object im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde betrachtet, dassel dunkler erscheint, als wenn man das mit dem grauen Glase bewaffnete Auge ga schliesst. FECHNER nennt diesen Versuch paradox, weil die totale Verdunkelu der einen Netzhaut erhellend auf das Gesammtgesichtsfeld wirkt; 2) tritt nahe eine gleiche Verdunkelung des gemeinsamen Gesichtsfeldes ein, wenn man v das eine Auge ein sehr wenig oder ein sehr viel Licht absorbirendes Glas (od sonstige Vorrichtung) bringt, — diese Verdunkelungen des Gesammtgesichtsfeld von gleicher Grösse bei ungleichen Componenten bezeichnet FECHNER als conju girte Intensitäten; bei einer gewissen Lichtabsorption des Glases tritt d maximale Verdunkelung im Gesammtgesichtsfelde auf: diesen Punkt nennt FECHN den Minimumpunkt. — Die Verdunkelung bleibt bei diesen Versuchen mehre Sekunden lang ganz gleichmässig, so dass man genügend Zeit hat, sich über d Grösse derselben zu orientiren. Setzt man die Beobachtungen aber bei sta verdunkelnden Gläsern über eine halbe oder ganze Minute lang fort, so tret abwechselnde Erhellungen und Verdunkelungen, sogenannte Wettstreitsphänome (cf. § 44) der Gesichtsfelder auf. (HERING, Beiträge zur Physiologie p. 310, – SCHÖN und MOSSO, Arch. f. Ophthalm. 1874, XX. 2, p. 269.) Will man m HERING die Fechner'schen Versuche als Wettstreitsphänomene ansehen, so schei mir damit nichts gewonnen — noch weniger kann ich aber der Behauptung v HELMHOLTZ (Physiol. Optik p. 791) beipflichten, dass es sich bei FECHNER's Ve suchen nicht um eine Aenderung in der Empfindung des Lichtes, sondern n

n eine Aenderung unseres Urtheils über die Körperfarbe des weissen Objectes ndele. Durch Benutzung von Objecten mit markirten Linien oder Contouren ird offenbar eine Störung für die einfache Helligkeitsempfindung gesetzt. — Die rsuche scheinen mir vielmehr zu ergeben, dass **eine Combination der eiderlei Empfindungen der Netzhäute eintritt, wenn die Differenz der Helligkeiten ein gewisses, durch den Versuch zu findenes Maass nicht überschreitet — über dieses Maass hinaus aber ie Combinationsfähigkeit der Empfindungen abnimmt und endch ganz aufhört.** Von Einfluss auf die Combinationsfähigkeit ist die absolute elligkeit des Objectes.

Zu meinen Bestimmungen über die Verdunkelungsgrösse, welche empfunden wird, wenn n einen Bogen gleichmässigen weissen Papiers in etwa 1 Meter Entfernung einige Sekunden ig betrachtet, habe ich mich des Episkotisters in der Form von Figur 54 bedient, vor welchem Schirm mit Oeffnungen für die beiden Augen des Beobachters befestigt war. Die Episkotister-

Fig. 54.

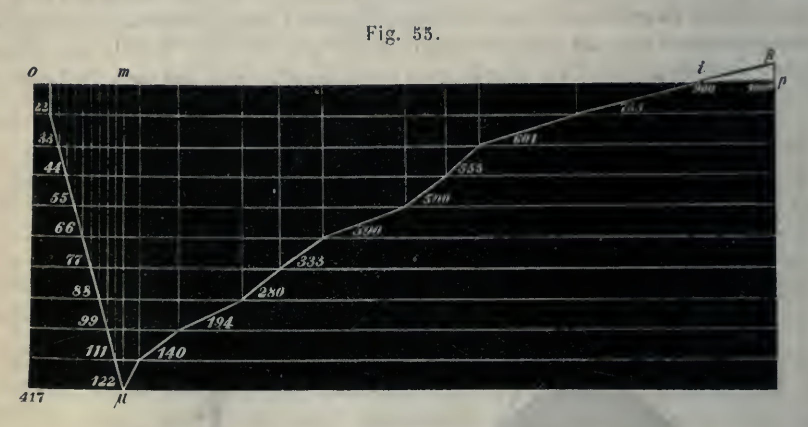


heibe *A* entspricht den helleren, wenig Licht absorbirenden Gläsern (Smoke-Gläsern) CHNER's, die Episkotister-Scheibe *B* den dunkleren. Der Episkotister bietet den Vortheil ner genaueren Variation und Bestimmung der Helligkeiten und hat ausserdem den Vorzug, n ganz farbloses Grau zu geben, während die Smoke-Gläser fast immer eine etwas verhiedene, für die Vergleichung der Helligkeiten sehr störende Färbung haben. Die stärkste rdunkelung im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde trat bei mir unter den angegebenen Verchsbedingungen ein, wenn das eine Auge frei war, für das andere 0,122 Theile des Lichtes rchgelassen wurden, oder wenn wir die Helligkeit des vollen Lichtes = 1000 setzen, bei ner Zulassung von 122 Theilen Licht für das eine Auge, wenn das andere frei war. Bei Zussung von weniger Licht erschien das gemeinschaftliche Gesichtsfeld heller, und ebenso, enn mehr Licht zugelassen wurde. Es müssen also Gesammthelligkeiten gefunden werden, elche einander gleich sind, wenn das eine Auge durch eine wenig, z. B. 55 Theile Licht rchlassende Scheibe, das andere durch eine viel, z. B. 500 Theile Licht durchlassende heibe sieht. FECHNER verzeichnet diese Zahlen auf einer Curve mit beliebiger Abscisse, ren grösste Ordinate der stärksten Verdunkelung im gemeinsamen Gesichtsfelde entspricht:

den sich so ergebenden niedrigsten Punkt der Curve nennt er den Minimumpunkt μ, gleichen Helligkeiten im gemeinsamen Gesichtsfelde bei starker und schwacher Verdunkel des einen Auges die conjugirten Punkte der Curve.

In der nach einer meiner Versuchsreihen entworfenen Curve Figur 55 op entsprechend der Helligkeitsempfindung des einen Auges, wenn das and geschlossen ist, der Punkt β der über op aufsteigenden Ordinate bedeutet etwas hellere Empfindung, wenn beide Augen offen sind, würde also $\frac{1}{10}$, a noch etwas mehr betragen, als Jurin, und fast ebensoviel, wie Harris gefunc hat. Von der absteigenden Curve bedeutet μ den Minimumpunkt, d. h. also Empfindung grösster Dunkelheit im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde, wenn

Fig. 55.



eine Auge vollständig frei ist. Dieser Punkt wurde erreicht, wenn für das and Auge 122 pro Mille Licht vom Episkotister durchgelassen wurden und die V dunkelung des Gesammtgesichtsfeldes war dann so gross, als wenn beim Seh mit nur einem Auge 583 Tausendstel durchgelassen oder 417 Tausendstel vollen Lichtes absorbirt wurden. Die Helligkeit des gemeinschaftlichen Gesich feldes im Minimumpunkte ist also etwas kleiner, als die halbe Helligkeit des ga unverdunkelten Gesichtsfeldes. Die Eintheilung der Ordinaten zwischen 0 u 417 ist durch gleichmässige Theilung der Ordinate erhalten, bedeutet also ni absolute Helligkeiten. Die neben der Curve stehenden Zahlen bedeuten die Men des durchgelassenen Lichtes, und die Punkte, in welchen die Curve von d Parallelen zur Abscisse geschnitten wird, bedeuten die conjugirten Punkte.

Etwas andere Zahlen habe ich erhalten, wenn ich statt weissen Papiers diffusen Tageslichte als Object den Himmel, oder die Milchglasglocke einer Lam und endlich die freie Flamme derselben betrachtete. Sie sind in der folgend Tabelle entsprechend Figur 55 verzeichnet.

Tabelle XIV.

I. Papier.	II. Milchglas-glocke.	III. Himmel.	VI. Freie Flamme.
22 = 738	16 = 750	16 = 700	16 = 444
33 = 601	22 = 666	22 = 500	22 = 377
44 = 555	23 = 400	33 = 333	33 = 333
55 = 500	44 = 333	44 = 128	44 = 250
66 = 390	55 = 250	55 = 83	55 = 200
77 = 333	66 = 166	66	(66 .... 166)
88 = 280	(77 .... 140)	333)	
99 = 194			
111 = 140			
122 (417)			

Für eine Erklärung dieser Empfindungen beim binocularen Sehen würde zunächst noch zu berücksichtigen sein, dass wir unsere Aufmerksamkeit dem Gesichtsfelde des einen Auges in verschiedenem Grade zuzuwenden fähig sind — Jeder wird diese Erfahrung gemacht haben, welcher z. B. beim Mikroscopiren beide Augen offen zu lassen pflegt oder sonstige Beobachtungen *à double vue* gemacht hat. Wenn wir diesen psychischen Einfluss möglichst eliminiren und durch Vermeidung von Schattirungen und Contouren im Gesichtsfelde Complicationen ausschliessen, so werden die Versuche aussagen, dass die Vorgänge in den beiden Netzhäuten sich zu einer Gesammtempfindung vereinigen, wenn die Vorgänge nicht sehr bedeutend von einander differiren, dass mit der Zunahme der Differenz aber eine Abnahme der Vereinigung Hand in Hand geht und dann die Empfindung desjenigen Auges überwiegt, welches von der grössten Helligkeit afficirt wird. Auf welche Art aber die Einwirkung der Vorgänge in den Netzhäuten zu Stande kommt, oder auf welchen Wegen dies geschieht, ist unbekannt; die Isolirung der Elemente der Sehsubstanz für das eine Auge von dem des anderen Auges wird darnach aber nicht als eine absolute angesehen werden können.

Wir werden beim Farbensinn (§ 44) und beim Raumsinn (§ 63) noch auf die Combination von Erregungen der beiden Netzhäute zurückkommen.

Zeitliche Verhältnisse beim Lichtsinne.

§ 30. **Ansteigen und Absteigen der Empfindung während der Reizung.** — Ein Empfindungsorgan, welches möglichst vollkommen den Zweck erfüllte, uns von den einwirkenden Reizen genau zu unterrichten, müsste mit dem Beginne des Reizes die ihm entsprechende volle Empfindung geben, während der Dauer des Reizes keine Veränderung in der Empfindung eintreten lassen und mit dem Aufhören des Reizes auch aufhören zu empfinden. Unser Sehorgan ist weit entfernt, diesen Anforderungen zu genügen: es lässt sich im Gegentheil nachweisen, dass, wenn ein Reiz auf das Empfindungsorgan einwirkt, die Empfindung sich in einer genau bestimmbaren Zeit von einem Minimum allmälig zu ihrer (relativ zu der Grösse des Reizes) maximalen Grösse entwickelt und dann wieder allmälig abnimmt.

Denken wir uns einen momentanen Reiz auf unsere Sehsubstanz wirkend so läuft die durch ihn ausgelöste Empfindung in einer gewissen Zeit ab und zwa mit wechselnder Intensität. Stellen wir uns den Reiz als einen Punkt auf de Zeitabscisse vor, so ist der Ablauf der Empfindung eine Curve, deren Abscisse di Zeit, deren Ordinaten die Intensitäten der Empfindung ausdrücken und welch etwa die Form wie in Figur 57 hat, d. h. von 0 bis zum Maximum m ansteig und dann allmälig wieder abfällt.

Dass ein Reiz erst nach endlicher Zeit die volle Empfindung erregt, ha zuerst Fick (Archiv für Anatomie und Physiologie 1863, p. 739) gezeigt: liess Fick einen Sector weissen Papiers mittelst eines Federapparates sehr schnell nu ein Mal vor dem Auge vorbeigehen, so erschien das weisse Papier so dunkel, wi schwarzes (dunkelgraues) Papier. Genauere Bestimmungen über das Ansteige der Empfindungscurve oder, wie es Fick nennt, »das Anklingen des Reizes«, ha Exner (Wiener Akademie-Berichte 1868, Bd. 58, II. p. 601) nach einer vo Helmholtz ersonnenen Methode gemacht. Dieselbe fusst auch auf der Ueberlegung, dass, wenn ein Reiz nach einer gewissen Zeit das Maximum der Empfindung hervorbringt, ein stärkerer Reiz schon nach kürzerer Zeit dieselbe Grösse der Empfindung bewirken muss. Erscheint also ein Object von der Helligkei $= 10$ nach $^1/_6$ Sekunde am hellsten, so wird ein Object von der Helligkeit $= 10$ schon nach viel kürzerer Zeit, z. B. schon nach $\frac{1}{123}''$ in gleicher Helligkeit erscheinen. — Zur Ermittelung der Zeiten ist eine Vorrichtung erforderlich, welch das eine Object eine kürzere, das andere Object eine längere Zeit auf die Netzhaut einwirken, d. h. sichtbar werden lässt und eine genaue Bestimmung un Vergleichung der Helligkeiten, so wie eine genaue Zeitmessung ermöglicht.



Fig. 56.

Zur Zeitmessung benutzte Exner eine rotirende Scheibe von schwarzem Sammet von der Form Figur 56 bei welcher die Oeffnung sowol des äusseren Sectors a, als die de inneren Sectors i stellbar ist. Rotirt die Scheibe in der Richtung de Pfeiles, so muss ein durch de äusseren Sector gesehenes Objec länger sichtbar sein, als ein durch den inneren Sector sichtbares Object, und die Zeiten, in welchen di Objecte sichtbar werden, sich ergeben aus der Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe und der Anzah von Graden, welche die Sectorausschnitte haben. Die innere Scheib wurde von Exner so lange verschoben, bis das längere Zeit sichtbare Object eben so hell erschien als das kürzere Zeit sichtbare Object. Den Objecten muss endlich eine messbare und vergleichbare Helligkeit gegeben werden. — Wegen des Genaueren übe

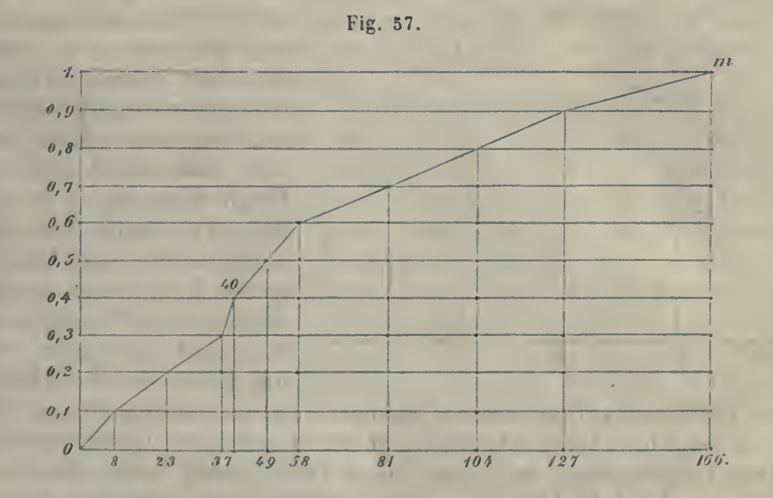
ie Ausführung der Versuche und die Construction der Apparate verweisen wir uf das Original p. 614.

Nehmen wir an, das Maximum der Empfindung sei bei einer bestimmten Vinkelgeschwindigkeit und Grösse des äusseren Sectorausschnittes und bei gerisser Helligkeit des Objectes erreicht worden, was Exner in besonderen sogleich u erwähnenden Versuchsreihen nachgewiesen hat, so wird ein helleres Object, velches nur beim Vorübergange des kleineren inneren Sectorausschnittes erscheint, noch nicht das Maximum der Empfindung erregt haben, wenn es von leicher Helligkeit wie das dunklere, aber längere Zeit gesehene Object erscheint.

Ferner wird aber, um die Grösse der bei dem helleren Objecte erreichten Empfindungsintensität zu berechnen, auch die Zeit zu bestimmen sein, in welcher as hellere Object sein Empfindungsmaximum erregt, denn Exner hat auch achgewiesen, dass bei grösserer Helligkeit des Objectes das Maxi- num der Empfindung früher erreicht wird, als bei geringerer lelligkeit desselben.

Mit Berücksichtigung dieses Factors hat Exner folgende Curve Figur 57 für as Anklingen der Empfindung gefunden, in welcher die Abscisse die Zeit in ,001 Sekunden, die Ordinaten die erreichte Intensität der Empfindung be-

Fig. 57.



euten, indem die willkürlich gewählte höchste Intensität in zehn gleiche Theile etheilt worden ist.

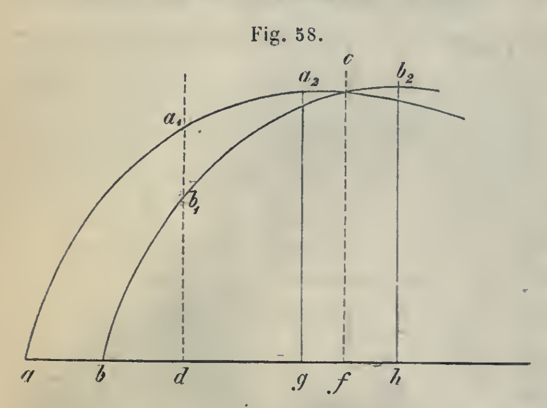
Zur Erreichung des Maximums der Empfindung waren also für die gegebene elligkeit erforderlich 0,166 oder $^1/_6$ Sekunden. Brücke (Wiener Akademieerichte 1864, Bd. 49, p. 26) hat nach einer anderen Methode, die wir später in 31 erwähnen werden, und für eine andere Beleuchtungsgrösse 0,186″ geınden. Die Curve verläuft, wenn wir die unvermeidlichen Versuchs- und eobachtungsfehler in Anschlag bringen, ziemlich gleichmässig, und steigt im anzen anfangs sehr rasch, dann immer langsamer.

Exner hat nun das Maximum der Empfindung, welche ein Reiz erregen kann, on folgender Betrachtung ausgehend bestimmt: hat ein Reiz nach einer gewissen

Zeit das Maximum der Empfindung hervorgebracht, so tritt bei fortdauernde Wirkung des Reizes eine Abnahme der Empfindungsintensität ein: das Obje erscheint dunkler, indem, wie man es ausdrückt, ein »negatives Nachbild« (§ 3 zur Geltung kommt. An das Maximum der Curve in Figur 57 würde sich al eine abfallende Curve, entsprechend der abnehmenden Helligkeitsempfindun anschliessen. Wir kommen darauf sogleich zurück. — Um nun das nur momen tan auftretende Maximum zu ermitteln, verfuhr Exner folgendermassen. Zw gleich helle Objecte erregen kurz hinter einander gleichartige Stellen der Net haut; die Objecte werden nach messbarer Zeit gleichzeitig verdeckt: ist von de ersten Reize das Maximum überschritten, von dem zweiten eben erreicht, so mu das erste Object dunkler erscheinen, als das zweite — ist von dem ersten d Maximum erreicht, so kann es von dem zweiten noch nicht erreicht sein, folgli muss das zweite Object dunkler erscheinen — wenn endlich beide Objec gleich hell erscheinen, so müssen die Empfindungen beide sehr nahe de Maximum sein.

Durch die Curve Figur 58 lässt sich der Gang der Erscheinungen leicht ve anschaulichen; die Abscisse bedeute wieder die Zeit, die Ordinaten die Empfi dungsintensitäten. Beginnt der eine (erste) Reiz in a und erreicht sein Maximu in a_2 und beginnt der ande (zweite) Reiz in b und erreic sein Maximum in b_2, so wir wenn die Reizung in $a_1 d$ abge schnitten wird, die Empfindu von dem ersten Reize a stärk sein, nämlich $= a_1 d$, als d Empfindung von dem zweite Reize b, nämlich $b_1 d$; dagege wird in a_2 und b_2 die Empfindu beider Reize nicht mehr se differiren und beim Abschneide in cf ganz gleich sein. Wand nun Exner als ersten Reiz eine weissen Papierring auf schwarzem Sammet, als zweiten Reiz einen weiss Sector an, und liess beide sehr rasch, aber mit messbarer Geschwindigkeit v dem Auge vorübergehen, so musste durch Verschiebung beider Objecte geg einander und durch Verkleinerung oder Vergrösserung des weissen Sectors ei Stellung und eine Rotationsgeschwindigkeit gefunden werden, bei welcher d Ring eben so hell als der Sector erschien, mithin kein Ring auf dem Sector g sehen wurde. Unter dieser Bedingung war das Maximum der Empfindung nahez erreicht. (Das Nähere s. bei Exner l. c. p. 614.)

Fig. 58.



Nach dieser Methode hat Exner die Maxima der Empfindung bei verschiede starken Beleuchtungen bestimmt und gefunden, dass bei zunehmender Reiz grösse (Beleuchtungsintensität) die zur Hervorbringung des Empfindungs maximums erforderlichen Zeiten abnehmen, und zwar, dass wenn di Reizgrössen in geometrischer Progression zunehmen, die Zeiten welche der Reiz zur Hervorbringung des Empfindungsmaximum braucht, in arithmetischer Progression abnehmen. Die Zahlen

welche Exner in einer Versuchsreihe gefunden hat, sind in Tabelle XV. verzeichnet, in welcher also mit Rücksicht auf Figur 58 $a = b$ ist, der zweite Stab die Zeit ab, der dritte Stab die Zeit af, berechnet aus ag und ah ausdrückt.

Tabelle XV.

Reizgrössen.	Zeit zwischen Beginn der Reize.	Mittel des Verschwindens der Empfindungsunterschiede.	Differenzen des Verschwindens.
1	0,0182	0,2873	
			0,0413
2	0,0174	0,2460	
			0,0460
3	0,0174	0,2000	
			0,0492
4	0,0174	0,1508	

Wie nach einer gewissen Dauer des Reizes die Empfindung grösster Helligkeit eintritt, so nimmt bei längerer Fortdauer des Reizes die Helligkeitsempfindung ab, d. h. das Object scheint an Helligkeit abzunehmen. Man hat diese schon lange bekannte Erscheinung als eine »Ermüdung« der Netzhaut aufgefasst oder auch die nach längerem Anschauen eines Objectes auftretende Abnahme der Helligkeit desselben als »Auftreten des negativen Nachbildes« gedeutet. Wenn unter Ermüdung nicht die Erklärung des Vorganges in Nerven verstanden, sondern nur damit die Thatsache des Abnehmens der Helligkeitsempfindung ausgedrückt werden soll, so werden wir von der Grösse und dem Gange der Netzhautermüdung sprechen dürfen.

Den Verlauf der Curve für die Netzhautermüdung hat C. F. Müller unter Fick's Leitung untersucht (Versuche über den Verlauf der Netzhautermüdung Diss. inaug. Zürich 1866). Müller blickte eine gemessene Zeit lang unverwandt auf ein weisses Papier und dann momentan auf ein mittelst eines Fallapparates rasch vorübergleitendes graues Papier, dessen Helligkeit im Verhältniss zu der Helligkeit des weissen Papiers photometrisch bestimmt war; er fand, dass ein weisses Papier von der Helligkeit = 1, wenn er es 5″ lang angesehen hatte, eben so erscheint, wie ein Papier von der Helligkeit 0,6; dass das helle Papier 30″ lang fixirt nur noch von der Helligkeit 0,35 bis 0,4 erscheint. Aus einer grösseren Reihe von Einzelversuchen fand er die allmälige Abnahme der Helligkeitsempfindung folgendermassen, wenn die Helligkeit des weissen Papiers = 1 gesetzt wird.

Ermüdungsdauer in Sekunden	3″	5″	10″	15″	20″	25″	30″
Scheinbare Helligkeit	0,72	0,66	0,49	0,46	0,43	0,37	0,35

Exner dagegen hat nach seiner etwas modificirten Methode eine viel steiler, wenigstens im Anfange, abfallende Curve erhalten; bei Exner würde die Helligkeitsempfindung nach 0,359″ auf 0,9, nach 0,486″ auf 0,8, nach 0,659″ auf 0,7 gesunken sein. Ob diese Differenz auf der Verschiedenheit der Versuchsmethode, oder der Beleuchtungsstärke, oder der Individualität beruht, — oder ob die Curven sich doch vereinigen lassen, wie Exner (p. 622) annimmt, lässt sich nach den vorliegenden Daten nicht entscheiden. Im Ganzen können wir annehmen, dass die Helligkeitsempfindung nach Erreichung des Maximums anfangs sehr rasch, dann immer langsamer abnimmt.

Veränderungen in der Form der Ermüdungscurve durch intensivere Beleuchtung hat Müller nicht gefunden, obgleich die von ihm angewendeten Beleuchtungen ziemlich bedeutend differirt haben müssen, da er sowohl bei voller Zimmerbeleuchtung und hellem Wetter, als bei theilweise geschlossenen Fensterläden Versuche ausgeführt hat. — Dagegen hat Müller eine Abnahme der Netzhautempfindlichkeit im Verlaufe des Tages constatirt, auf die auch ich schon aufmerksam gemacht hatte (Aubert, Beiträge zur Physiologie der Netzhaut. Abhandlungen der Schlesischen Gesellschaft, Breslau 1861, p. 39 und Moleschott's Untersuchungen VIII. p. 252), welche Müller so formulirt: »am Abende erscheint der Retina irgend ein Object nur in 0,49 derjenigen Helligkeit, in welcher es ihr am Morgen erschienen wäre.« Ferner erschien Müller die weisse Scheibe

Morgens	$7^h\ 30'$	nach $20''$	mit der Helligkeit von	0,43
-	$9^h\ 30'$	- $20''$	-	0,59
-	12^h —	- $20''$	-	0,70
Nachmittags	$2^h\ 30'$	- $20''$	-	0,80
-	$4^h\ 30'$	- $20''$	-	0,81

d. h. die Ermüdungscurve ändert sich mit den Tageszeiten sehr erheblich.

Es ist ferner zu erwähnen, dass Maxwell (Edinburgh Journal 1856, IV. p. 337) und Helmholtz (Physiol. Optik 420) so wie Exner (l. c. p. 629) fanden, dass die *Fovea centralis* sich in Bezug auf das An- und Abklingen der Erregung anders verhält und zwar träger ist, als die übrige Netzhaut. Daran schliessen sich Beobachtungen, wonach Objecte, welche indirect gesehen werden, bei fester Fixation nach einigen Sekunden ganz verschwinden. Dies scheint zuerst Troxler (Himly und Schmidt, Ophthalmologische Bibliothek 1802, II. Stück 2) beobachtet zu haben: er brachte Objecte von verschiedener Form und Farbe auf einem gleichmässigen Grunde an und fand, dass dieselben alsbald sich verloren und zwar zuerst das vom fixirten Punkte am weitesten entfernte. Auch Purkinje (Beiträge I. p. 76 — II. p. 14), Brewster (Briefe über natürliche Magie an Walter Scott, Berlin 1835, p. 19 und Handbuch der Optik 1835, p. 81), Förster (Hemeralopie p. 13) und ich (Physiologie der Netzhaut p. 98) haben Troxler's Beobachtung bestätigt und unter sehr verschiedenen Verhältnissen das Verschwinden von Objecten von der Peripherie nach dem Centrum hin auftreten sehen. Das Nähere habe ich in meiner Physiologie der Netzhaut und in Poggendorff's Annalen Bd. 116 (1862), p. 267 angegeben.

§ 31. Dauer der Lichtempfindung nach dem Reize. Positive Nachbilder. — Wenn wir uns den gleichmässig wirkenden Reiz als eine gerade, parallel zur Abscisse verlaufende Linie vorstellen und die Empfindung während dessen eine auf- und dann wieder absteigende Curve bildet, so finden wir weiter noch eine Incongruenz zwischen Reiz und Empfindung darin, dass die Empfindung den Reiz überdauert, also bei plötzlichem Abfall der Reizlinie auf 0, die Empfindung keineswegs auch auf 0 fällt. Wenn wir z. B. ein Object während der fast momentanen Beleuchtung durch den elektrischen Funken sehen, so dauert die Empfindung noch viele Sekunden fort — eine rasch im Kreise bewegte glühende Kohle scheint einen gleichmässig hellen vollständigen Kreis zu bilden — ein Sector auf den Masson'schen Scheiben erscheint bei gewisser Rotationsgeschwindigkeit als ein gleichmässiger Kranz. Plateau (Annales de Chimie et de

Physique 1835, T. 58, p. 337) hat diese Erscheinungen als *persistance des impressions* bezeichnet, Brücke bezeichnet sie als positives Nachbild (Poggendorff's Annalen 1851, Bd. 84, p. 436), in welchem das hell ist, was im Objecte hell ist, während im negativen Nachbilde das hell ist, was im Objecte dunkel ist und umgekehrt. Verschiedene andere Benennungen für Nachbilder habe ich in meiner Physiologie der Netzhaut p. 347 und p. 354 zusammengestellt. Peiresc (Vita Peirescii von Gassendi. Edit. tertia 1658, p. 175) scheint zuerst positive Nachbilder gesehen zu haben, und zwar nachdem er auf ein Fenster geblickt hatte und dann die Augen schloss.

Wenn seitdem auch viele Bedingungen ermittelt worden sind, unter welchen positive Nachbilder auftreten und ihre Mitwirkung beim Sehen von Objecten nachgewiesen ist, so fehlt es anderseits noch an Bestimmungen und Messungen über ihre Intensität im Verhältniss zu der primären Empfindung und über ihre Dauer.

Man kann ganz allgemein sagen, dass positive Nachbilder beobachtet werden, wenn der Reiz (der primäre Eindruck) sehr kurze Zeit auf die Netzhaut eingewirkt hat und andere Reize vorher und nachher von der Netzhaut abgehalten worden sind. Schliesst und bedeckt man die Augen einige Sekunden lang, blickt dann ganz kurze Zeit, etwa eine Sekunde lang auf ein mehr oder weniger helles Object, z. B. in die Sonne, auf eine Kerzenflamme, auf ein Fensterkreuz, auf ein Papierblatt im diffusen Tageslichte oder bei künstlicher Beleuchtung und schliesst

Fig. 59.



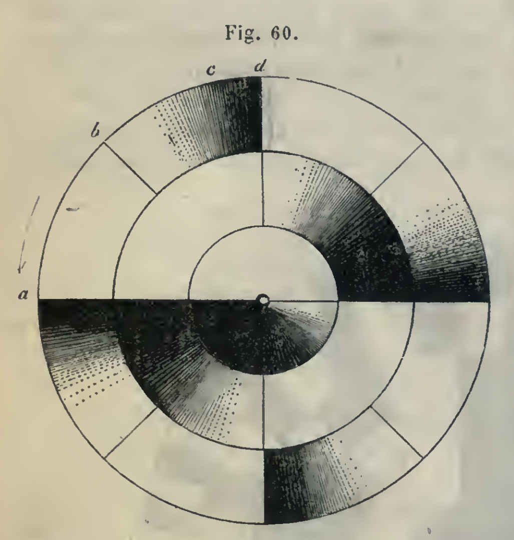
dann die Augen und bedeckt sie, ohne sie zu drücken, so sieht man das Object noch in gleicher Weise wie bei geöffneten Augen, aber matter und im Laufe

einiger Sekunden allmälig verblassend bis zum gänzlichen Verschwinden (Helmholtz, Bericht über die 34. Versammlung Deutscher Naturforscher, Karlsruhe 1858). Dasselbe ist der Fall, wenn man im finsteren oder verdunkelten Zimmer den überspringenden elektrischen Funken direct, oder die von ihm beleuchteten Objecte gesehen hat. (Aubert, Moleschott's Untersuchungen V. p. 279.)

Positive Nachbilder, oder eine Fortdauer der Empfindung nach Aufhören des primären Eindruckes, treten ferner auf, wenn man Scheiben, welche abwechselnd schwarze und weisse Sectoren haben, mit einer gewissen Geschwindigkeit rotiren lässt, oder überhaupt, wenn ein helles oder leuchtendes Object sich auf dunklem Grunde mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegt: eine glühende Kohle im Finstern geschwungen erscheint als ein Streifen oder auch als ein Ring, ebenso eine helle Fläche auf einer schwarzen rotirenden Scheibe.

Auf die Erscheinungen, welche eine im Finstern geschwungene glühende Kohle darbietet, werden wir noch zurückkommen in § 46, die Entwickelung des positiven Nachbildes und seine Combination mit dem primären Eindrucke ist von Brücke (Wiener Akademie-Berichte 1864, Bd. 49, p. 1) einer besonderen Untersuchung unterworfen worden. Brücke findet nämlich, dass Scheiben, wie Figur 59, bei gewisser Rotationsgeschwindigkeit verschiedene Helligkeiten der einzelnen Ringe darbieten, und zwar, dass derjenige Ring am hellsten erscheint, bei welchem der weisse Sector 17,6 Mal in der Sekunde wiederkehrt. Bei schnellerer Aufeinanderfolge erscheint der Ring dunkler, bei langsamerer Folge unterbrochen weiss und schwarz und zwar so wie in Figur 60 versucht worden ist, darzustellen, dass nämlich die weissen Sectoren nur zum Theil über die schwarzen übergreifen oder die Empfindung des Weiss schon aufhört, bevor noch der schwarze Sector vorbeigegangen ist. Bei 17,6 Wiederholungen in der Sekunde dauert aber die Nachempfindung oder das positive Nachbild des Weiss so lange, dass der schwarze Sector vorübergehen kann und der Rest des positiven Nachbildes noch vorhanden ist, wenn der nächstfolgende weisse Sector erregend wirkt: unter diesen Umständen hat 1) die primäre Erregung Zeit genug, das Maximum der Empfindung auszulösen, 2) das positive Nachbild so lange Dauer, dass der schwarze Sector bei grosser Lebhaftigkeit des Nachbildes vorbeigeht; daher kann das Schwarz am wenigsten zur Geltung kommen. Bei schnellerer Rotation hat nun die primäre Erregung nicht Zeit genug, das Maximum der Empfindung hervorzubringen, der schwarze Sector fängt schon an zu wirken, bevor der Gipfel der ansteigenden Empfindungscurve erreicht ist, das Weiss erscheint daher weniger hell. — Ich habe in verschiedenen Versuchen für meine Augen 18,66

Fig. 60.



bis 20,33 Vorübergänge des Weiss in 1″ am günstigsten für die Hervorbringung der grössten Helligkeitsempfindung gefunden. (AUBERT, Physiologie der Netzhaut p. 356. — Vergleiche EXNER, Pflüger's Archiv 1870, Bd. III. p. 218 u. 226.)

Was ferner die Intensität und Dauer des positiven Nachbildes betrifft, so ist dasselbe, wie HELMHOLTZ (Physiol. Optik p. 358) angiebt, im Ganzen um so heller und dauert um so länger, je grösser die Intensität des primären Lichtes, d. h. des Objectes ist: das helle Nachbild der Sonne bleibt oft mehrere Minuten lang stehen, während die positiven Nachbilder von mässig erleuchteten Gegenständen eine erkennbare Dauer von etwa zwei Sekunden haben — auch verschwinden die helleren Partien des angeschauten Objectes im Nachbilde später. Ich habe gleichfalls gefunden, dass das positive Nachbild länger dauert, wenn der elektrische Funken direct beobachtet wird, als wenn Objecte betrachtet werden, welche der elektrische Funke beleuchtet.

Eine genaue Bestimmung der Dauer des positiven Nachbildes dürfte indess sehr schwierig sein, da der Verlauf desselben auch bei der momentanen Wirkung des elektrischen Funkens kein ganz gleichmässiger und einfacher ist in den verschiedenen Regionen der Netzhaut, wie wir im nächsten Paragraph sehen werden — ausserdem habe ich bemerkt, dass bei sehr schwacher Beleuchtung des Objectes durch den elektrischen Funken das positive Nachbild viel länger dauert, als bei starker Beleuchtung (AUBERT in Moleschott's Untersuchungen V. p. 301). Auch EXNER (Wiener Akademie-Berichte 1872, Bd. 65, III.) stellt auf Grund verschiedener Beobachtungen geradezu den Satz auf: »Je schwächer die Reizung, desto länger das Nachbild« — was doch nur abwärts von gewissen Intensitäten der Beleuchtung, aber nicht ganz allgemein gelten dürfte. EXNER's Angabe, dass wenn eine in schwarze und weisse Sectoren getheilte Scheibe bei gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit intensiv beleuchtet ist, man noch deutliches Schwarz und Weiss auf einander folgen sieht, bei Herabsetzung der Beleuchtung aber die Scheibe nur noch flimmernd oder sogar gleichmässig grau erscheint, ist allerdings ganz richtig und die Thatsache schon von HELMHOLTZ (Physiol. Optik p. 344) und von mir (Physiologie der Netzhaut p. 352) festgestellt worden. — Hier scheinen also noch weitere Untersuchungen erforderlich zur Lösung der Widersprüche.

§ 32. Die negativen Nachbilder. PLATEAU's Oscillationen. — Unter negativen Nachbildern versteht man nach BRÜCKE's Definition (Poggendorff's Annalen 1851, Bd. 84, p. 436) diejenigen nach dem Aufhören des Reizes stattfindenden Empfindungen, in welchen das dunkel ist, was im Objecte hell war und umgekehrt. Blickt man z. B. einige Sekunden lang durch ein Fenster nach dem hellen Himmel und schliesst dann die Augen, so sieht man nach mehreren Sekunden die Scheiben des Fensters dunkel, das Kreuz desselben hell erscheinen; öffnet man die Augen und sieht unverrückten Blickes einige Sekunden lang auf ein weisses Papier, so erscheint gleichfalls ein helles Fensterkreuz mit dunklen Scheiben. HELMHOLTZ (Physiol. Optik p. 357) nennt die nach der primären Erregung einwirkenden Helligkeiten »reagirendes Licht«, insofern dasselbe ein Reagenz auf die veränderte Reizbarkeit der Netzhaut ist.

Negative Nachbilder werden beobachtet, wenn man einige Sekunden oder Minuten ein Object unbewegten Blickes angesehen hat, indem man irgend einen Punkt desselben fixirt und dann die Augen schliesst oder auf einen gleich-

mässigen Grund von mässiger Helligkeit blickt, indem man auf diesem auch wieder einen Punkt fixirt. Bei der im gewöhnlichen Leben meist grossen Unstätheit des Blickes pflegen uns die Nachbilder zu entgehen und nur gelegentlich wenn wir etwas angestarrt haben oder sinnend in die Ferne geblickt haben, bemerkt zu werden. Als Object kann Alles dienen zur Erzeugung von negativen Nachbildern, am auffallendsten sind die Nachbilder aber, wenn in dem Objecte grosse Helligkeitsdifferenzen oder Contraste neben einander sind, wie Schwarz und Weiss, wenn wir also z. B. ein Stück weisses Papier auf schwarzem Sammet oder umgekehrt einige Zeit anstarren, oder die Sonne am Himmel, oder eine Flamme auf dunklem Hintergrunde und dergleichen.

Wir werden nun zunächst die Entwickelung, die Dauer, Intensität und die Wandlungen der negativen Nachbilder betrachten, und dann die Vorstellungen andeuten, welche man sich von den Vorgängen in der Netzhaut oder Sehsubstanz gemacht hat zur Erklärung der Erscheinungen.

In § 30 ist bereits darauf eingegangen worden, dass bei längerer Betrachtung eines Objectes die von Müller sogenannte Ermüdungscurve abläuft: schon Fechner (Poggendorff's Annalen 1840, Bd. 50, p. 201) hat hervorgehoben, dass bei längerer Betrachtung eines hellen Objectes die Helligkeit und Farbe desselben immer mehr abnimmt und hat diese Erscheinung aufgefasst als die Entwickelung des negativen Nachbildes. Verändert man bei einer solchen Betrachtung eines hellen Objectes, z. B. der untergehenden Sonne die Blickrichtung auf einen Augenblick, so sieht man neben dem Objecte das negative Nachbild desselben, also neben der Sonne am Himmel das dunkle Bild der Sonnenscheibe. Den Anfang der Entwickelung des negativen Nachbildes müssen wir also w e n i g s t e n s v o n d e r E r r e i c h u n g d e s E m p f i n d u n g s m a x i m u m s an rechnen. Nach den Auseinandersetzungen Exner's (Pflüger's Archiv 1870, Bd. III, p. 224) würde aber schon die ansteigende Reizungscurve als aus zwei Curvenelementen zusammengesetzt anzusehen sein, deren erstes die reine Reizung, deren zweites die Wirkung des (positiven) Nachbildes darstellen würde, und er hat diese beiden Elemente durch Construction (a. a. O. Fig. III) zu sondern versucht.

Ich glaube für Exner's Annahme eine Beobachtung geltend machen zu können, welche ich beim Beobachten der durch den elektrischen Funken beleuchteten Objecte gemacht habe: sah ich auf eine Reihe dunkler Quadrate auf hellem Grunde, so sah ich gleichzeitig (scheinbar) mit dem Erscheinen der dunkeln Quadrate beim Ueberspringen des Funkens helle Quadrate, welche meist ein wenig gegen die dunkeln Quadrate verschoben waren. Ich habe es als wahrscheinlich angesehen (Moleschott's Untersuchungen 1858, Bd. V, p. 309), dass eine sehr kurze, nicht mehr wahrnehmbare Zeit zwischen dem Auftreten der dunkeln und der hellen Quadrate vergangen sei und die Verschiebung derselben gegen einander die Folge einer Augenbewegung gewesen sei — jedenfalls würde die Beobachtung beweisen, dass schon vor der Erreichung des Empfindungsmaximums (für welche der elektrische Funken eine zu kurze Dauer hat) negative Nachbilder ausgelöst werden — denn als solche müssen wir die hellen Quadrate ansehen. Erst nach einer Pause taucht dann das positive Nachbild der Quadrate aus dem Dunkel auf.

Wenn nun das negative Nachbild sich während der Betrachtung des Objectes entwickelt, so wird zu erwarten sein, dass je länger die Anschauung des Objectes

dauert, um so länger auch die Dauer des negativen Nachbildes ist: eine solche Proportionalität ist allerdings nicht nachgewiesen, im Ganzen findet man aber das Verhalten ungefähr derartig, dass bei längerer Dauer des Anschauens ein und desselben Objectes auch die Dauer des Nachbildes eine längere ist. Fixire ich z. B. die Abendsonne 3″ lang, blicke dann daneben auf den Himmel 5″ lang, indem ich das negative Nachbild fixire, dann 8″ lang noch weiter daneben, und beobachte dann die 3 auf den Himmel projicirten Nachbilder, so ist das erste nach etwa 2—3 Minuten, das zweite nach etwa 5 Minuten, das dritte erst nach etwa 10 Minuten verschwunden. — Ferner ist die Helligkeit des Objectes und die Helligkeitsdifferenz gegen seine Umgebung maassgebend für die Dauer des Nachbildes: ein Nachbild von der Sonne dauert viel länger als ein Nachbild von weissem Papier, welches durch diffuses Tageslicht beleuchtet wird: das Nachbild von einem weissen Papierstück dauert aber länger, wenn es auf schwarzem Sammet, als wenn es auf grauem Papier gelegen hat.

Ebenso ist die Intensität des Nachbildes abhängig von der absoluten Helligkeit des Objectes und von dem Unterschiede seiner Helligkeit gegen die Umgebung: man kann sich davon leicht überzeugen, wenn man ein weisses Quadratcentimeter und graue Quadratcentimeter von verschiedener Helligkeit etwas entfernt von einander auf schwarzen Sammet legt und dann die Nachbilder auf ein gleichmässiges weisses Papier projicirt: das Nachbild von dem weissen Quadrate ist dann immer am dunkelsten.

Ferner ist von Einfluss auf die Dauer und auf die Intensität der negativen Nachbilder die Intensität des reagirenden Lichtes an sich und im Verhältniss zu dem primären Lichtreize — am längsten finde ich die Dauer eines durch Betrachten von weissem Papier erzeugten Nachbildes, wenn ich auf dunkelgraues (sogenanntes schwarzes) glanzloses Papier im diffusen Tageslichte blicke; auch ist das Nachbild dann intensiver, als wenn ich auf weisses Papier sehe.

Von grossem Einflusse auf das Nachbild sind aber Veränderungen des reagirenden Lichtes während der Beobachtung des Nachbildes, wie schon Peiresc (Vita Peirescii 1658, p. 175) angemerkt hat, indem ihm das Nachbild von matten Fensterscheiben hell erschien, wenn er die Augen schloss, dunkel, wenn er auf eine mässig beleuchtete Wand blickte: bei geschlossenen Augen ist also das Nachbild positiv, bei geöffneten Augen negativ. Ich finde, dass bei einem solchen Wechsel des reagirenden Lichtes in nicht zu weiten Grenzen das Nachbild am allerlängsten dauert, wie auch Marangoni (Poggendorff's Ann. 1872, Bd. 146, p. 115) beobachtet hat, und werde sogleich einen Versuch von Purkinje angeben, in welchem nach 10 Sekunden langer Wirkung des primären Eindruckes das Nachbild noch nach einer Viertelstunde zu bemerken war.

Es sei endlich noch erwähnt, dass das Nachbild um so länger dauert und um so intensiver wird, wenn man die Augen möglichst unbewegt hält, also einen Punkt auf der reagirenden Fläche recht ruhig und sicher fixirt.

Abgesehen von dem durch Veränderung des reagirenden Lichtes hervorgerufenen Wechsel im Nachbilde treten aber bei unverändertem reagirenden Lichte Phasen und Wandlungen des Nachbildes auf. Abgesehen von den Farbenwandlungen der sogenannten Blendungsbilder, wie man die durch Anschauen der Sonne und der hellen Lichtflammen hervorgebrachten Nachbilder bezeichnet,

treten nämlich auch im geschlossenen und bedeckten Auge Uebergänge von positiv zu negativ auf. Purkinje (Beiträge I, 1823, p. 105) hat zuerst den Uebergang von positiven Nachbildern in negative deutlich beobachtet und beschrieben: »Ich sah das Fenster bei einem grau überzogenen Tageshimmel durch 20 Sekunden starr an. Nachdem ich das Auge mit der Hand wohl bedeckte, erschienen mir zuerst die Scheiben weiss, die Rahmen schwarz. Während nun die weissen Vierecke verschwanden und schwarze an ihre Stelle traten, wurde das Fensterkreuz nach und nach licht; so wechselte die Erscheinung zwischen Licht und Finsterniss 4 bis 5 Mal, bis alles in einen schwachen, grauen Schimmer zerfloss. Dies dauerte 5 Minuten, und auch dann, als ich die Hand von meinen Augen zog und schwaches Licht durch die Augenlider einströmte, stand das Fensterbild wieder in voller Deutlichkeit mit dunkeln Scheiben und lichten Fensterrahmen da.« Ich habe diesen Versuch Purkinje's immer in allem Wesentlichen bestätigt gefunden (Physiologie der Netzhaut p. 374) und namentlich constatirt, dass der Wechsel des Nachbildes nicht etwa durch Lidschläge oder Bewegungen der Augen oder durch veränderten Druck auf die Augen bewirkt wird: er tritt auch keineswegs plötzlich, sondern sehr allmälig auf. Plateau hat gleichfalls derartige Wandlungen beobachtet und sie Oscillationen genannt (Poggendorff's Ann. 1834, Bd. 52, p. 550, cf. Aubert, Physiol. der Netzhaut p. 374). Fechner (Poggendorff's Ann. Bd. 44, p. 525) und Helmholtz (Physiol. Optik p. 364) wollen dieselben auf Lidschläge und dergleichen zurückführen; die Oscillationen halten aber im Purkinje'schen Versuche ihren Gang trotz absichtlicher Lidschläge und Augenbewegungen (wenn man nur Druck auf den Bulbus vermeidet) inne, zeigen einen ganz allmäligen Ablauf, nicht ruckweise Uebergänge, und treten endlich unter besonderen Umständen örtlich zu verschiedenen Zeiten auf. Blickt man auf eine Reihe weisser Quadrate auf dunklem Grunde, indem man eins derselben sicher fixirt, so sieht man, wenn man das Nachbild auf einen mässig hellen Grund projicirt, einzelne Quadrate verlöschen, während die übrigen bleiben, dann die verloschenen wiederkehren, während andere verlöschen (Aubert in Moleschott's Untersuchungen 1858, IV, p. 231). Dasselbe habe ich beobachtet, wenn ich die Reihe der Quadrate mit dem elektrischen Funken beleuchtete (ibid. V, p. 311). — Auch Hering (Wiener Akademie-Ber. 1873, Bd. 58, III, § 18) ist bei seinen Beobachtungen zu der Ueberzeugung gekommen, dass das periodische Verschwinden und Wiedererscheinen der Nachbilder nicht lediglich durch zufällige Störungen bedingt ist.

Unter besonderen Verhältnissen, nämlich unter gleichzeitiger Wirkung des simultanen Contrastes scheint nun die Helligkeit der Nachbilder grösser werden zu können, als die des Objectes war. — Hering (l. c. § 16) führt folgenden Versuch zum Beweise dessen an: »Man klebe auf eine weisse hellbeleuchtete und weit ausgebreitete Fläche einen etwa 1 Ctm. breiten Streifen von mattschwarzem Papier oder Sammet und auf den Mittelpunkt des Streifens ein sehr kleines Schnitzel weissen Papiers, welches als Fixationspunkt zu dienen hat. Nachdem man diesen Punkt $^1/_2$—1 Minute lang fixirt hat, mindere man rasch die Beleuchtung (durch Herabdrehen des Lampendochts oder dergl.). Hierbei bemerkt man deutlich, wie der schwarze Streifen rasch heller, der weisse Grund rasch dunkler wird, und sobald die Beleuchtung hinreichend gemindert ist, erscheint der schwarze Streifen heller als der weisse Grund.« Das negative Nach-

ild des schwarzen Streifens hat also eine grössere Helligkeit, als das Weiss des irundes darbietet nach der Verdunkelung der Lichtquelle. — Hering hat noch inige ähnliche Versuche angegeben.

Die angegebenen Erscheinungen positiver und negativer Nachbilder lassen ich nur theilweise als auf Fortdauer der Erregung und auf Ermüdung beruhend nsehen, und wir dürfen auch nicht ausser Acht lassen, dass diese Ausdrücke eine Erklärung enthalten, sondern nur eine Classificirung der Erscheinungen der eine Umschreibung derselben bezwecken können, da Ermüdung ein physioogisch völlig unerklärter Vorgang ist.

Eine wirkliche Erklärung der Empfindungsvorgänge in der Sehsubstanz bei ler Empfindung von Hell und Dunkel würde nur möglich sein, wenn uns die 'eränderungen im Empfindungsorgane physikalisch und chemisch bekannt wären.)a dies auch nicht annähernd bekannt ist (cf. Fechner, Elemente der Psychohysik 1860, p. 281 u. f.), so werden wir nur im Stande sein, eine Formulirung nserer Erfahrungen zu versuchen, welche mit anderweitigen physiologischen 'orstellungen und Postulaten nicht im Widerspruche oder denselben ganz fremd st. Eine derartige Hypothese ist von Exner (Pflüger's Archiv 1870, III, p. 23) ngedeutet und von Hering (Wiener Akademie-Berichte 1874, Bd. 69, III, Aprileft § 27 u. f.) eingehend entwickelt worden. Beide nehmen an, dass das obective Licht eine Veränderung der disponiblen Kräfte in der Netzhaut bewirkt, welcher ein Restitutionsprocess folgt. Hering nimmt, wie wir schon in § 22 anührten, geradezu chemische Veränderungen der Sehsubstanz, einen Dissimilaionsprocess und einen Assimilationsprocess an, und stellt den Satz auf, dass »was uns als Gesichtsempfindung zum Bewusstsein kommt, der psychische Ausdruck oder das bewusste Correlat des Stoffwechsels der Sehsubstanz ist«. Die Contrasterscheinungen (§ 28) fordern lie Annahme, dass wenn an einer Stelle der Netzhaut ein Dissimilationsprocess tattfindet, die übrige Netzhaut zu einem lebhafteren Assimilationsprocesse veranlasst werde — die positiven Nachbilder würden als eine Fortsetzung des einnal eingeleiteten Dissimilationsprocesses, die negativen Nachbilder als Vorgänge ler Assimilation oder Restitution aufzufassen sein: da aber Dissimilation und Assimilation oder Stoffverbrauch und Ernährung gleichzeitig erfolgen, so würde Lichtempfindung ununterbrochen stattfinden, mit der Dissimilation aber auch mmer Assimilation, also während eines stärkeren Lichtreizes eine grössere Dissinilation und eine verhältnissmässig zu kleine Assimilation stattfinden, deren Auslruck das negative Nachbild, welches die Empfindung der Helligkeit vermindert, sein würde: einer starken Dissimilation würde aber eine entsprechend verstärkte Assimilation, also Empfindung einer anfangs grossen, dann aber abnehmenden Dunkelheit folgen. — Ein weiteres Eingehen auf Hering's Theorie, die er selbst nur »als Programm für spätere Mittheilungen« betrachtet, scheint hier nicht am Orte, indess wird m. E. schon jetzt manches durch dieselbe geklärt und ich finde nicht, dass Thatsachen mit derselben unvereinbar wären.

§ 33. Mischung schnell aufeinanderfolgender Reize. Talbot-Plateau'scher Satz. — Wenn Lichtreize verschiedener Art auf ein und dieselbe Netzhautstelle rasch hintereinander wirken, so kann nach dem Besprochenen lie durch jeden einzelnen Reiz erregte Empfindung nicht ihren vollen Ablauf

haben, vielmehr wird weder das Maximum der Empfindung ausgelöst, noch kann die Entwickelung des positiven und negativen Nachbildes stattfinden. Merkwürdigerweise findet, wie Talbot (Philosoph. Magaz. Ser. III. 1834, Vol. V p. 321) und Plateau (Poggendorff's Annalen 1835, Bd. 35, p. 458) gefunden haben, von einer gewissen Geschwindigkeit der Wiederkehr der Eindrücke an bis zur grössten erreichbaren Geschwindigkeit eine Vermischung der Eindrücke von der Art statt, dass eine gleichmässige Empfindung entsteht und dieselbe einer Helligkeit entspricht, welche entstehen würde, wenn die Helligkeiten sämmtlicher Eindrücke gleichmässig vertheilt wären. Diese Erfahrung wird der Talbot-Plateau'sche Satz genannt.

Plateau hat diesen Satz durch Versuche bewiesen, in welchen er die Helligkeit weissen Papiers durch Entfernung von der Lichtquelle so lange veränderte, bis es eben so hell erschien, wie eine rotirende schwarze Scheibe mit weissem Sector, welche sich in grösserer Nähe der Lichtquelle befand. Die Helligkeiten fand Plateau einander gleich, wenn das Quadrat des Abstandes der rotirenden Scheibe von der Lichtquelle sich zum Quadrate des Abstandes des weissen Papiers verhielt, wie die Winkelbreite des weissen Sectors zum ganzen Kreisumfang. Noch directer hat Helmholtz (Physiologische Optik p. 340) den Talbot-Plateau-schen Satz bewiesen, indem er eine mit vielen schwarzen und weissen Sectoren bedeckte Scheibe durch eine Convexlinse so betrachtete, dass das Bild der Scheibe in die Fläche der Pupille fiel und grösser war als die Pupille: die Scheibe erscheint dann gleichmässig hell und die Helligkeit bleibt dieselbe, wenn die Scheibe in schnelle Rotation versetzt wird. Auch die Versuche von Fick bestätigen den Talbot-Plateau'schen Satz: Fick (Müller's Archiv 1863, p. 739) bestimmte die Helligkeit verschiedener grauer Papiere im Verhältniss zu weissem Papier, liess dann einen Sector von x^0 weissen Papiers vor einem nahezu lichtlosen Raume rotiren und verglich die Helligkeit der entstehenden Kreisscheibe mit der Helligkeit der grauen Papiere. Die Differenz der Helligkeit der Scheiben gegen die Papiere beträgt im Maximum $^1/_7$, die Differenzen der einzelnen Bestimmungen für die Helligkeiten der grauen Papiere für sich aber $^1/_{15}$. Die Differenz ist also sehr gering und fiel auch nicht in gleichem Sinne in verschiedenen Versuchsreihen aus. (cf. Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 351.)

Nach den bisherigen Ermittelungen über den zeitlichen Verlauf der Lichtempfindung ist das von Plateau erhaltene Resultat nicht vorauszusagen. Offenbar kann bei sehr schneller Rotation das positive Nachbild nicht zur Entwickelung kommen, denn dann müsste, wie in Brücke's Versuchen, die Helligkeit der rotirenden Scheibe grösser sein — anderseits muss man aber annehmen, dass die einzelnen weissen Sectoren zu schnell vorübergehen, als dass ein Anklingen bis zum Maximum stattfinden kann — und drittens, dass jeder folgende Sector das unterbrochene Anklingen des vorhergehenden Sectors wieder aufnimmt. Besonders hervorzuheben ist mit Bezug auf diese Verhältnisse, dass bei Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit über das Maass, bei welcher die Scheibe homogen erscheint, keine Veränderung in der Helligkeit oder dem Aussehen derselben eintritt: wenn z. B. eine Scheibe, wie in Figur 59, so schnell rotirt, dass auch der innerste Ring homogen erscheint, so ist auch der äusserste Ring, an welchem der Eindruck des Weiss 32 Mal öfter in derselben Zeit wiederkehrt, von gleicher homogener Helligkeit.

Plateau hat als untere Grenze für die Häufigkeit der Wiederkehr des Weiss, enn die Scheibe homogen erscheinen soll, gefunden, dass der Eindruck des eiss etwa 60 Mal in der Sekunde wiederkehren muss, oder genauer: 12 Mal in ,191 Sekunden bei Beleuchtung der Scheibe im diffusen Tageslichte; Emsmann Poggendorff's Annalen 1854, Bd. 91, p. 611) hat im Mittel eine 48malige Wiederehr, ich (Physiologie der Netzhaut p. 352) eine 49- bis 53malige Wiederkehr in er Sekunde nöthig gefunden. Dagegen genügten bei Brücke (Wiener Akademieerichte 1864, Bd. 49, p. 6) 35 Wiederholungen des Eindrucks im diffusen ageslichte — und nach den Angaben von Helmholtz (Physiol. Optik p. 344) ürden für ihn etwa 24 Wiederholungen bei stärkstem Lampenlicht, und sogar 0 Wiederholungen bei Beleuchtung durch den Vollmond genügen, um die cheiben ohne alles Flimmern zu sehen. Bei einer schwachen, etwa dem Vollonde entsprechenden Beleuchtung mittelst des Diaphragmas im finstern Zimmer 24) habe ich wenigstens 25 Wiederholungen in 1″ nothwendig für meine Augen efunden, um die Scheibe homogen zu sehen.

B. Der Farbensinn.

§ 34. Farbe und Farbenempfindung. — Die Empfindung der Farbe t ebenso wie die Empfindung von Weiss, Schwarz oder Grau eine besondere ualitative Empfindung. Sie kann durch die physikalische Hypothese über die igenschaften der verschiedenen Aetherwellen nicht erklärt werden, sondern uss als ein besonderer Vorgang in der Sehsubstanz aufgefasst werden, welcher ne specifische Energie derselben voraussetzt. Erfahrungsgemäss werden Farbenpfindungen, und zwar die vielleicht lebhaftesten und schönsten durch Druck ıf den Augapfel erzeugt bei objectiv tiefster Dunkelheit.

Um das Chaos der Farbenempfindungen im physiologischen Interesse zu dnen, müssen wir Empfindungsreihen zu gewinnen suchen, und wir werden n zweckmässigsten und einfachsten zweierlei Reihen unterscheiden: 1) die arbentöne, d. h. Empfindungen, welchen kein Weiss und kein Schwarz beiemischt ist, 2) Farbennüancen, d. h. Empfindungen, welche durch Mischung on Weiss, Grau oder Schwarz mit einem Farbentone entstehen. Alle unsere ırbenempfindungen lassen sich reduciren auf 4 einfache (Leonardo da Vinci) ler principale (Aubert) Empfindungen: Roth, Grün, Gelb und Blau, aus nen alle bekannten Farbentöne gemischt werden können; jeder dieser Farbenne kann mit Weiss, Grau oder Schwarz gemischt werden.

Die Empfindung eines absolut reinen Farbentons ist uns ebenso wie die mpfindung eines absoluten Schwarz und eines absoluten Weiss unbekannt: der Farbenton des Sonnenspectrums kann reiner oder an Färbung intensiver npfunden werden, wenn wir vorher die sogenannte complementäre Farbe npfunden haben, z. B. Blau, wenn wir vorher Gelb, Grün, wenn wir vorher oth empfunden haben. Ob wir jemals das Maximum der möglichen Farbeneinit empfinden, bleibt unbekannt und ist ausserdem unwahrscheinlich. Wir

empfinden daher factisch immer Farbennüancen, d. h. Farben, denen noch irgen eine farblose Helligkeit beigemischt ist. — Betrachten wir irgend ein möglich intensiv gefärbtes Pigment, Papier oder Glas durch ein Prisma, so finden w immer, dass mehrere Farben erscheinen: der Hauptfarbe sind also noch ande Farben beigemischt, welche einander zu Grau ergänzen und die Empfindung d Hauptfarbe beeinträchtigen — damit also die Hauptfarbe nüanciren. — Fern wenn wir einen reinen Farbenton, z. B. des Spectrums, betrachten, so entwicke sich gleichzeitig die sogenannte Complementärfarbe in unserer Sehsubstanz un da beide Farbentöne zusammen die Empfindung der Farblosigkeit bedingen, s wird mit der Entwickelung der Complementärfarbe immer ein Theil der prim wirkenden Farbe ausgelöscht — diese würde also nur im ersten Momente d Anschauens in voller Reinheit oder Sättigung auftreten können.

Wir haben umgekehrt auch nie die Empfindung eines absolut reinen Wei oder Schwarz, sondern immer die Beimischung eines Farbentons zu jedem Wei und Grau: dies wird sofort klar, wenn wir verschiedene weisse Objecte m einander vergleichen; frischgefallener Schnee, weisses Papier, weisses Porzella weisse Leinwand haben immer neben einander betrachtet einen schwache Farbenton von Bläulich oder Gelblich. Dasselbe gilt für graue Objecte.

Denken wir uns an der einen Ecke eines gleichseitigen Dreiecks einen a solut rein gedachten Farbenton, an der zweiten Ecke ein absolut reines Weis an der dritten Ecke ein absolut reines Schwarz, so lassen sich auf der Fläche d Dreiecks alle überhaupt denkbaren Nüancen des gewählten Farbentons ve zeichnen. So viel Farbentöne, so viel Nüancirungs-Dreiecke sind möglich un damit würden alle überhaupt möglichen Lichtempfindungen erschöpft sei (Hering, Wiener Akademie-Berichte 1874, Bd. 69, III. Maiheft § 39.)

In gleicher Weise, wie wir uns eine Empfindungsreihe vom tiefsten Schwa bis zum intensivsten Weiss vorstellen, welche also sämmtliche farblosen Empfi dungen enthalten würde, denken wir uns Empfindungsreihen zunächst für d einfachen oder principalen Farben Roth, Grün, Gelb und Blau. Reines (nic spectrales mit Gelb gemischtes) Roth und reines Grün mit einander gemisc geben eine farblose Empfindung von Grau, ebenso reines Gelb und reines Bla — reines Roth aber bildet einerseits alle erdenklichen Farbentöne durch Gelbrot und Blauroth, in welchen also je zwei Farben empfunden werden, oder erkan werden, anderseits Grün alle erdenklichen Farbentöne durch Gelbgrün und Blau grün, ebenfalls mit je zwei erkennbaren Principalfarben. — Hering (l. c. § 4 bezeichnet demgemäss Roth und Grün nicht als complementäre, sondern a antagonistische Farben, indem sie sich in der Erregung der Farbenempfindun entgegenwirken oder aufheben, und ebenso Gelb und Blau.

Wenn wir so unsere farblosen und farbigen Empfindungen classificiren, s würde sich daraus folgende Auffassung des Sonnenspectrums und des weisse Lichtes ergeben in Bezug auf die Wirkung, welche die Strahlen desselben i unserer Sehsubstanz hervorbringen. Unsere Sehsubstanz würde sich aus 3 ve schiedenen Substanzarten zusammensetzen, nämlich 1) aus der Substanz für d Empfindungen von Schwarz bis Weiss, 2) aus der Substanz für die Empfindunge von Roth bis Grün, 3) für die Empfindungen von Gelb bis Blau. Nennen wir d Kürze halber mit Hering diese Substanzen die schwarz-weisse, die roth-grün die blau-gelbe, so werden wir den bereits besprochenen Satz, dass keine Farb

oder Farbenton in vollkommener Reinheit empfunden werden kann, dahin ausdrücken müssen, dass von allen objectiven Farben immer auch die schwarz-weisse Substanz afficirt wird. — Wird nun durch objectives Gelb und Blau in solchem Mischungsverhältnisse die Sehsubstanz afficirt, dass die farbigen Empfindungen einander aufheben, so bleibt von ihnen nur noch die Wirkung auf die schwarz-weisse Substanz übrig und die resultirende Empfindung ist ein farbloses Grau. Dasselbe gilt für Roth und Grün. Wirken also sämmtliche Strahlen des Spectrums ein, so werden die Empfindungen des Gelb und Blau, des Roth und Grün ausgelöscht und es bleibt nur die Empfindung der schwarz-weissen Substanz übrig. Man kann also nicht sagen: Gelb und Blau gemischt geben Grau, sondern man muss sich denken: die auf die schwarz-weisse Substanz von dem Gelb und Blau ausgeübte Wirkung bleibt bestehen, wenn die auf die gelb-blaue Substanz ausgeübte Wirkung gleich Null geworden ist. — Dieser Auffassung entspricht sehr gut die schwache Empfindung, welche ein aus lebhaftem Gelb und lebhaftem Blau gemischtes Grau hervorbringt (cf. § 35.) Die roth-grüne Substanz würde einerseits vom äussersten Roth des Spectrums bis zum reinen Gelb, anderseits vom grünlichen Gelb bis zum Blau und dann wieder von dem im Violett des Spectrums enthaltenen Roth afficirt werden; im vollen Gelb aber und im vollen Blau gar nicht erregt werden, und zwar im vollen Gelb deswegen nicht, weil die Wirkung des Roth und die antagonistische Wirkung des Grün einander aufheben — im vollen Blau deswegen nicht, weil die Wirkung auf die grün-rothe Substanz wieder mit der Gegenwirkung des Violett auf die grün-rothe Substanz zusammenfällt. — Die gelb-blaue Substanz aber würde vom Roth bis zum Grün und vom ersten bläulichen Grün bis zum Ende des Spectrums erregt werden.

Mit dieser von Hering (Wiener Akademie-Berichte 1874, Bd. 69, III. Maiheft) aufgestellten Theorie, welche auf der Aussage unserer Empfindungen fusst, lassen sich die Beobachtungen am besten und bequemsten in Einklang bringen, wie wir in der Folge sehen werden. Ich habe daher kein Bedenken getragen, der Hering'schen Theorie zu folgen, da die Young-Helmholtz'sche Theorie manche Erscheinungen gar nicht, manche nur sehr gezwungen zu erklären vermag, und sich eigentlich nur auf Vorgänge im Nerven vor der eigentlichen Empfindung, nicht auf eine Erklärung der Empfindungen bezieht. — Beide Theorien könnten daher mit einigen Modificationen sehr wohl neben einander bestehen, wenn man den Erregungsvorgang streng unterscheidet von dem Empfindungsvorgange.

Dass die verschiedenen Uebergangstöne von Roth zu Gelb, Grün zu Blau u.s.w. nicht auf einer objectiven Mischung von Aetherwellen beruhen, ist als nachgewiesen anzusehen. (Helmholtz, Physiologische Optik p. 290.) Es kann sich also für uns nur um die Frage handeln, welche Einrichtungen in unserem Empfindungsorgane anzunehmen sind, um die Empfindung so verschiedener Farbentöne und die Empfindung von Weiss oder Grau durch Mischung gewisser Farbentöne zu ermöglichen. Young (Philosophical Transactions 1802, p. 19) und Helmholtz (Physiol. Optik p. 291 und Müller's Archiv 1852, p. 461) haben die Hypothese aufgestellt und durchzuführen versucht, dass drei Grundempfindungen stattfinden, die Empfindung von Roth, Grün und Violett, dass die diesen Grundempfindungen dienenden Nervenfasern durch die verschiedenen Farbentöne des

Spectrums verschieden stark erregt werden und die Summe der Erregungen zu einer resultirenden Empfindung führt. Helmholtz (Physiol. Optik p. 291) denkt sich die Erregbarkeitscurven der drei Faserarten in der Weise angeordnet, dass das spectrale Roth die rothempfindenden Fasern stark, die beiden anderen schwach, das spectrale Gelb die roth- und die grünempfindenden Fasern mittelstark, die violettempfindenden schwach, das spectrale Grün die grünempfindenden Fasern stark, die beiden anderen schwach, das spectrale Blau die grün- und violettempfindenden Fasern mittelstark, die rothempfindenden schwach, endlich das spectrale Violett die violettempfindenden Fasern stark, die übrigen schwach erregt. Erregung aller drei Faserarten in ziemlich gleicher Stärke würde die Empfindung von Weiss geben.

Da es ein Widerspruch in sich selbst ist, zu sagen, dass roth- und grünempfindende Fasern die Empfindung von Gelb hervorbringen, so habe ich, auf Young's Auffassung zurückgehend, in meiner Physiologie der Netzhaut p. 179 die Fasern als roth-grün- u. s. w. leitende bezeichnet. Das Resultiren der Empfindung bleibt bei dieser Auffassung aber ganz unerklärt, es wird damit nur der Weg, welchen die Erregung vor dem Empfindungsorgan zu nehmen hat, bezeichnet, denn wenn die Empfindung von Roth und Grün ausgelöst ist, so ist der Empfindungsprocess abgelaufen und es kann nicht mehr die Empfindung von Gelb hervorgebracht werden. Es müssten dann zweierlei Organe angenommen werden, das erste für die nicht zum Bewusstsein kommende Empfindung, das zweite für die zum Bewusstsein kommenden Empfindungen — wofür keine Erfahrungen geltend gemacht werden können.

Indess abgesehen davon, dass die Young-Helmholtz'sche Hypothese das nicht erklärt, was erklärt werden soll, stehen derselben noch andere Bedenken entgegen: zunächst bleibt völlig unerklärt die Empfindung des Schwarz, eine den übrigen Empfindungen jedenfalls völlig gleichwerthige Empfindung. Welche Fasern sollen diese Empfindung hervorbringen? Wenn die Empfindung des Schwarz auch bei Mangel objectiven Lichtes auftritt, so ist die Empfindung des Schwarz doch unzweifelhaft ein positiver Empfindungsprocess, welcher nicht gleich Null gesetzt werden kann. Zweitens ist es unerklärlich nach der Young'schen Hypothese und speciell nach den Erregbarkeitscurven, welche Helmholtz (Physiol. Optik p. 291 Figur 119) giebt, warum Gelb und Blau gemischt nicht die Empfindung von Grün geben, da doch die grünempfindenden Fasern sowohl von Gelb wie von Blau mittelstark erregt werden müssen: man würde höchstens erwarten können, ein mit Grau gemischtes Grün zu empfinden. Drittens ist das Entstehen der Empfindung von Weiss aus der Mischung von Gelb und Blau eben so räthselhaft, wie die Entstehung der Empfindung von Gelb aus der Mischung rother und grüner Strahlen, da sowohl die Empfindung von Weiss wie die Empfindung von Gelb principale Empfindungen sind, gleichwerthig den Empfindungen von Roth, Grün, Blau und Schwarz.

Von einem andern Gesichtspunkte aus hat daher Mach (Wiener Akademie-Berichte 1865, Bd. 52, p. 19) die Form der Young'schen Hypothese dahin verändern wollen, dass ausser den vier Farben Roth, Gelb, Grün und Blau auch noch Schwarz und Weiss als Grundfarbenempfindungen angenommen würden, Empfindungen, die auch ich (Physiologie der Netzhaut p. 186) als Principal-

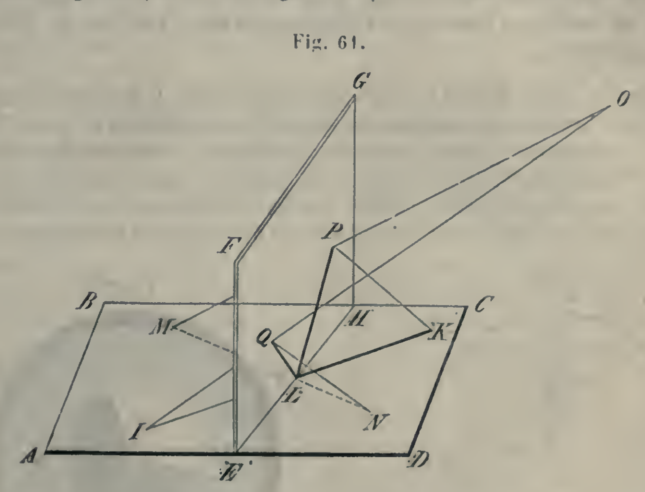
empfindungen aufgestellt habe. HERING hat diese Auffassung l. c. weiter begründet und zu einer Theorie entwickelt.

Was ich (Physiologie der Netzhaut p. 108) als »Farbenintensität« bezeichnet habe, fällt nach HERING's Theorie mit unter den Begriff der Farbennüance, so dass wir nur Farbenton und Farbennüance zu unterscheiden haben werden.

§ 35. **Aufhebung der Farbenempfindung durch Mischung objectiver Farben.** — Die im vorigen Paragraphen angeführten Auffassungen von der Farbenempfindung basiren auf der zuerst von HELMHOLTZ in ihrer Wichtigkeit erkannten Entdeckung von LAMBERT (Photometria 1760, § 1190, p. 527) und PLATEAU (s. Poggendorff's Annalen 1853, Bd. 88, p. 172 und Moigno's Kosmos II. p. 241), dass Mischung blauer und gelber Lichtstrahlen die Empfindung von Weiss oder Grau hervorbringt und der weiteren Entdeckung von HELMHOLTZ (Müller's Archiv 1852, p. 475 und Physiol. Optik p. 279), dass durch Mischung verschiedener anderer Farbenpaare des Spectrums die Empfindung eines farblosen Weiss oder Grau hervorgebracht werden kann, z. B. durch die Mischung von Roth und Blaugrün, von Orange und Cyanblau, von Graugelb und Violett.

Die Methoden, welche man benutzt hat, um durch die Mischung von Farben die Empfindung von Weiss zu erzeugen, bestehen theils in einer Mischung des Lichtes, welches von farbigen Pigmenten reflectirt wird, theils in einer Mischung der einzelnen Abschnitte des prismatischen Farbenspectrums. Die erste Methode ist in verschiedenen Formen angewendet worden, nämlich erstens in der Form, dass man das von einem Pigmente auf einer Glasplatte gespiegelte Bild projicirt auf das zweite Pigment, wie es Figur 61 (nach LAMBERT's Photometria p. 527,

Fig. 61.



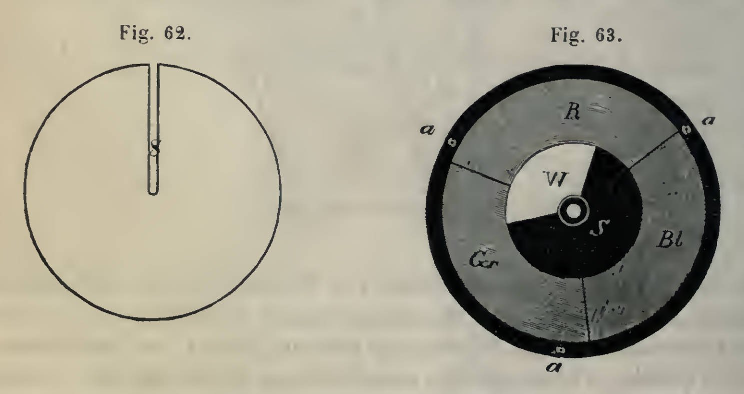
Figur 33) zeigt. — Eine zweite, auch von LAMBERT (l. c. p. 529) herrührende Form besteht darin, dass man die durch Linsen in eine *Camera obscura* geworfenen Bilder von farbigen Flächen zur Deckung bringt. — Eine dritte, wohl von DU TOUR (Müller, Physiologie des Gesichtssinnes p. 80 und 193) herrührende Form besteht darin, dass man die von farbigen Pigmenten auf die Netzhäute der beiden Augen geworfenen Bilder durch Convergenz der Sehaxen zur Deckung

bringt. — Eine vierte von VOLKMANN (Müller's Archiv 1838, p. 373) herrührende Form ist die, dass man zwei Pigmentfarben in verschiedene Entfernung vom Auge bringt und die Zerstreuungskreise der einen mit der deutlich gesehenen andern Farbe sich decken lässt, oder nach CHALLIS (Poggendorff's Annalen 1836 Bd. 37, p. 528) dicht neben einander befindliche Linien von verschiedenen Farben aus einer solchen Entfernung betrachtet, dass dieselben in Folge der Zerstreuungskreise zusammenfliessen, oder nach MILE (Müller's Archiv 1839, p. 64) farbige poröse Gewebe oder auch farbige Gläser dicht vor das Auge bringt und auf das andersfarbige Pigment durch dieselben blickt. — Nach CZERMAK's (Wiener Akad.-Berichte 1855, Bd. XV, p. 457) Vorschlag bringt man vor die eine und andere Oeffnung des Schirmes im Scheiner'schen Versuche (§ 13) Gläser von verschiedener Farbe und blickt auf ein ungefärbtes Object in deutlicher Sehweite. — Nach einer anderen, von DOVE (Poggendorff's Annalen 1847, Bd. 71, p. 97) angegebenen Methode mischt man Interferenz- und Absorptionsfarben: ein farbiges Glas mit Silberbelag reflectirt von seiner vorderen Fläche weisses, polarisirtes, von der belegten Fläche farbiges unpolarisirtes Licht; letzteres geht durch eine Glimmerplatte und Nichol'sches Prisma unverändert durch, ersteres wird durch die Interferenz des ordentlichen und ausserordentlichen Strahls im Krystall so gefärbt, dass seine Farbe einer der Farbenstufen von NEWTON's Ringsystemen entspricht. (cf. HELMHOLTZ, Physiol. Optik p. 306.)

Die bequemste und am meisten vervollkommnete Form dieser Methode besteht in der Mischung der Farben mittelst des Farbenkreisels, welcher wahrscheinlich zuerst von MUSSCHENBROEK (Introductio ad Philosophiam 1768, T. II. § 1820), später besonders von PLATEAU angewendet und neuerdings von MAXWELL (Transactions of the Royal Society of Edinburgh 1857, Vol. 21, p. 275) sehr vervollkommnet worden ist.

Die Verbesserung durch MAXWELL besteht namentlich darin, 1) dass die Grösse der farbigen Sectoren, welche die Kreisscheibe zusammensetzen, leicht verändert und genau gemessen werden kann. MAXWELL benutzt die schon § 25 erwähnten Scheiben mit radialem Schlitz Figur 62, deren viele bequem mittelst des Schlitzes hintereinander gesteckt und gegen einander verschoben werden können, so dass von jeder Scheibe ein Sector von einer bestimmten Anzahl von Graden zu sehen ist; diese farbigen Scheiben werden mittelst eines Blechringes *a a a* Figur 63

Fig. 62. Fig. 63.



gegen eine sehr ebene Pappe oder Blechscheibe festgeschraubt, damit sie bei sehr schneller Rotation fest liegen bleiben; 2) dass die Helligkeit der farblosen Mischungen in Bezug auf

weisses Papier bestimmt und gleich aussehende Mischungen von verschiedenen Componenten mit einander verglichen werden können. Dazu dienen kleine Scheiben von starkem Cartonpapier *W*, *S* in Figur 63, welche im Centrum durch eine Schraube befestigt werden.

Man erhält dann z. B. durch eine Mischung von Roth, Grün und Blau ein Grau, welches genau ebenso aussieht, wie ein aus Mischung von Schwarz und Weiss gewonnenes Grau, also etwa

165 Roth + 122 Grün + 73 Blau = 100 Weiss + 260 Schwarz.

Bezüglich des Mechanismus bemerke ich hier nur, dass ich vermöge mehrerer Scheiben und Schnurläufe, deren eine mittelst einer Kurbel gedreht wurde, eine Rotationsgeschwindigkeit bis 100 Umdrehungen in der Sekunde erzeugt habe — dass ferner die Scheiben behufs gleichmässiger Beleuchtung und bequemer Beobachtung in senkrechter, nicht wie bei Maxwell in horizontaler Ebene rotirten, und dass es zweckmässig ist, die Scheiben erst zu beobachten, wenn alles Flimmern aufgehört hat. Wegen des Näheren verweise ich auf meine Physiologie der Netzhaut p. 159 u. f.

Indess alle diese Methoden, die von Pigmenten reflectirten Farben zu mischen, leiden an dem Uebelstande, dass alle Pigmente keineswegs nur die eine Art von farbigem Lichte zurückwerfen, nach welchem wir sie benennen, und dass die farbigen Papiere aus verschiedenen Fabriken sehr differiren, ausserdem sich im Laufe der Zeit verändern trotz sorgfältigster Abhaltung von Licht zur Zeit, wo sie nicht benutzt werden. Die gewonnenen Gleichungen gelten also nur von bestimmten, sozusagen individualisirten Pigmenten.

Da es auch anderweitig von Interesse ist, die Reinheit der Pigmente zu kennen, so führe ich hier an, dass man sehr leicht die sämmtlichen von einem Pigmente reflectirten Farben übersehen und feststellen kann, wenn man von den farbigen, natürlich matten und völlig glanzlosen Papieren kleine Streifen von $^1/_2$ bis 1 Mm. Breite und etwa 10 Mm. Länge schneidet, auf reinen und tiefschwarzen Sammet ohne Falten legt, gut mit diffusem Tageslicht oder directem Sonnenlicht beleuchtet und mit einem gleichseitigen Flintglasprisma aus einer Entfernung von 1 Meter betrachtet. Der Gesichtswinkel für die Breite ist dann so gering, dass an weissem Papier noch die Frauenhofer'schen Linien *D* und *E* bemerkt werden können, der Gesichtswinkel für die Länge aber so gross, dass die Farben sehr deutlich hervortreten.

Das Spectrum des sehr schönen rothen Papiers zeigt Roth und Orange, dunkles Grün, eine Spur Blau und schwaches Violett — das orangefarbene Papier giebt Roth, Orange und Gelb, dunkles Grün, eine Spur Violett, es fehlen die gelbgrünen, blaugrünen und blauen Töne — reines chromgelbes Papier giebt die ganze untere Seite des Spectrums bis zum Grün und eine kaum merkliche Spur von Blau und Violett — das grüne (Arsenik) Papier zeigt kein Roth, schwaches Orange, Gelbgrün, Grün, Blaugrün, ein wenig Blau — das ultramarinblaue Papier enthält den oberen Theil des Spectrums vom Blaugrün bis zum Ende des Violett, und ausserdem sehr schwaches Roth und Grün — endlich in dem Spectrum eines violetten Fuchsinpapiers fehlen gänzlich Gelbgrün und Blaugrün, Grün ist auch nur schwach vertreten.

Pigmente also, welche eine sehr intensive Farbenempfindung bewirken und kaum verschieden von den Farben des Spectrums erscheinen, enthalten doch immer noch eine Beimischung von anderen Farbentönen und geben also am Farbenkreisel immer sehr complicirte Mischungen von allen möglichen Farbentönen.

Die einzige Methode, aus reinen Farbentönen eine farblose Mischung herzustellen, bleibt die älteste von Newton (Opticks Book I. Pars II. Prop. III—VI und VIII, in der Ausgabe von 1717, p. 109—147) angewendete Methode, die Farbentöne zweier prismatischer Spectra mit einander zu mischen. Helmholtz (Physiol. Optik p. 303) hat diese Methode erst wieder benutzt und dadurch den Nachweis

geliefert, dass man aus zwei reinen Farbentönen des Spectrums eine farblose Mischung erhalten kann. Helmholtz' Methode und eine neuere Methode von Maxwell (Philosophical Transactions 1860, T. 150, p. 57—84) sind schon be Snellen und Landolt, Chromatoptometrie in Bd. III. dieses Handbuches, p. 46, beschrieben. Ebenda p. 48 ist auch die Beschreibung des mehr zur Untersuchung in der Praxis geeigneten Rose'schen Farbenmessers gegeben.

Aus den Untersuchungen mit Farbentönen des prismatischen Spectrums hat nun Helmholtz (Physiol. Optik p. 279) den Nachweis geliefert, dass die Empfindung von farblosem Weiss oder eigentlich Grau hervorgebracht wird, wenn folgende Farbentöne gemischt werden:

Roth und Blaugrün,
Orange und Cyanblau,
Gelb und Indigblau,
Grüngelb und Violett.

Mit diesem Resultate stimmen die am Farbenkreisel mit Pigmenten gemachten Erfahrungen ganz überein, wie aus den folgenden von mir an sehr lebhaft farbigen Papieren gemachten Versuchen und den daraus gefundenen Gleichungen hervorgeht:

165° Roth + 73° Blau + 122° Grün = 100° Weiss + 260° Schwarz α
111° Orange + 117° Blau + 132° Grün = 134° Weiss + 226° Schwarz β
17° Gelb + 140° Grün + 203° Fuchsin = 150° Weiss + 210° Schwarz γ
146° Gelb + 197° Blau + 17° Grün = 159° Weiss + 201° Schwarz δ

Allgemein lässt sich auf Grund der bisherigen Beobachtungen und mit Hülfe der Newton'schen Theorie nach Grassmann (Poggendorff's Annalen 1853, Bd. 89, p. 73) der Satz aufstellen: es giebt zu jeder Farbe eine andere homogene Farbe, welche, mit ihr vermischt, farbloses Licht liefert. Mit Rücksicht auf § 34 würden wir diesen Satz mehr physiologisch so ausdrücken können: es giebt zu jedem Farbentone einen anderen Farbenton, dessen Beimischung die Empfindung der Farbe aufhebt und eine Empfindung von Grau (eine Empfindung der schwarz-weissen Reihe) auslöst.

Es folgt daraus, dass ein Weiss oder Grau, welches man empfindet, sehr verschiedene objective Componenten haben kann, oder wie es Hering ausdrückt, dass die schwarz-weiss empfindende Substanz von allen Strahlen des sichtbaren Spectrums afficirt wird. Da wir bis jetzt den Antheil, welchen die einzelnen Farbentöne an der Erregung dieser Substanz haben, nicht kennen, so werden wir die Grassmann'sche Voraussetzung (l. c. p. 82) als gültig ansehen müssen, »dass die gesammte Lichtintensität der Mischung die Summe ist aus den Intensitäten der gemischten Lichter« und demgemäss finden wir in den obigen vier Farbengleichungen ein Grau von sehr verschiedener Helligkeit als die Resultante der verschiedenen Farbencomponenten. Es wird eine weitere Aufgabe sein, durch Combination verschiedener Farben den Antheil zu ermitteln, welchen dieselben an der Erregung der schwarz-weiss empfindenden Substanz haben und wir werden im folgenden Paragraphen sehen, dass für Pigmentfarben bestimmter Art dieser Antheil sich bestimmen lässt.

§ 36. Construction einer Farbentafel für die Farbentöne und Farbennüancen. — Wir haben uns in § 34 vorgestellt, dass in einem gleich-

seitigen Dreieck alle möglichen Empfindungen zwischen der höchsten Reinheit einer Farbenempfindung und zwischen Schwarz und Weiss anderseits müssen verzeichnet werden können. Für jeden Farbenton würde aber ein besonderes Dreieck anzunehmen sein. Denken wir uns die Farbentöne auf einer Kreislinie eingetragen, so werden wir uns den Radius als die eine Seite des Nüancirungsdreieckes denken können, wenn der Mittelpunkt des Kreises der Empfindung des reinen Weiss entspricht; denken wir uns weiter in dem Mittelpunkte eine Normale errichtet, so werden wir an das obere Ende desselben die Empfindung von Schwarz verlegen können, und wir bekämen dann rechtwinklige Nüancirungsdreiecke, welche zusammen einen Kegel bilden würden. — Eine annähernde Construction dieser Art ist von Maxwell für die mit dem Farbenkreisel gewonnenen Gleichungen gemacht worden (Transactions of the Society of Edinburgh 1857, Vol. XXI. p. 279) unter Zugrundelegung der schon von Newton gemachten Annahme, dass die Intensität einer Farbe als ein Gewicht aufgefasst und bei einer Mischung von Farben der gemeinschaftliche Schwerpunkt durch Construction gefunden werden kann. Helmholtz hat den Beweis der Richtigkeit von Maxwell's Construction unter gewissen Voraussetzungen geliefert. (Physiologische Optik p. 283—287.)

Man wählt nach Maxwell drei beliebige Farben, welche mit einander ge-

Fig. 64.



mischt ein eben solches Grau geben, wie man es durch gleichzeitige Mischung von Weiss und Schwarz erhält. Tragen wir die drei Farben der Gleichung α Roth, Blau und Grün an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks in Figur 64 *R*,

B, Gr ein, so wird zunächst der Schwerpunkt für Blau und Grün auf der Verbindungslinie BGr liegen, und zwar um so näher an B, je mehr Blau in der Mischung enthalten ist. Wir haben für Blau 73 Gewichtseinheiten, für Grün 122; den Punkt α finden wir daher nach der Proportion

$$\alpha B : \alpha Gr = 122 : 73$$

Ziehen wir nun, um diese Werthe mit Roth in Verbindung zu setzen, die Hülfslinie αR, so muss auf dieser der Schwerpunkt für die drei Farben liegen; wir finden ihn in gleicher Weise, wenn der gesuchte Punkt W ist, aus

$$\alpha W : WR = 165 : (122 + 73)$$

W ist dann der Schwerpunkt, d. h. der Punkt für die farblose Mischung.

Das gewonnene Grau ist aber dunkler als das Weiss des angewendeten weissen Papiers, und zwar $\frac{360}{100}$ oder 3,6 Mal dunkler als das weisse Papier. Diese Zahl hat Maxwell als Coefficienten für Weiss bezeichnet, ohne ihn in der Construction zu verwerthen; er würde auf einer auf W Normalen zu verzeichnen sein. Auf diesen Punkt W können wir nun alle Gleichungen beziehen, welche Grau geben und werden dann die Winkel für andere Farbentöne finden können, welche sie z. B. mit RW bilden. In Gleichung β haben wir Orange als neue Farbe; wir finden wie oben zunächst die Lage des Punktes β auf der Linie BGr, ziehen von β eine Linie durch W (da die Mischung ja auch Grau giebt) und müssen nun den Punkt für Orange finden nach der Proportion

$$\delta W : Wx = 111 : (132 + 117).$$

Indess müssen wir, um die Gesammtintensität des Weiss zu erhalten, die Zahl der Grade für Weiss = 134 mit dem Coefficienten für das Weiss der vorigen Gleichung = 3,6 (oder mit Berücksichtigung der Helligkeit des Schwarz = 3,45) multipliciren und erhalten dann auf der rechten Seite der Gleichung 462 W. Wenn wir davon (132 + 117) abziehen, so erhalten wir 213 Or als corrigirten Werth statt 111 Or, also die Proportion

$$\delta W : WOr = 213 : 249,$$

woraus sich die Lage des Punktes für Or, oder Orange ergiebt.

In derselben Weise sind Lage und Coefficient für die andern Gleichungen gefunden und in Figur 64 eingetragen worden, und zwar für folgende Gleichungen:

17 Gelb	+ 140 Grün	+ 203 Fuchsin	= 140 Weiss	+ 220 Schwarz	ε)
23 Orange	+ 159 Grün	+ 178 Fuchsin	= 150 Weiss	+ 210 Schwarz	ζ)
141 Grün	+ 219 Roth	= 73 Gelb	+ 52 Weiss	+ 235 Schwarz	ϑ)
175 Grün	+ 185 Orange	= 150 Gelb	+ 60 Weiss	+ 150 Schwarz	$\varkappa$)
133 Blau	+ 212 Roth	+ 15 Weiss	= 212 Fuchsin	+ 148 Schwarz	λ)
212 Blau	+ 148 Orange	= 248 Fuchsin	+ 18 Weiss	+ 94 Schwarz	μ)

Wie man aus der Figur 64 sogleich ersieht, sind die Bestimmungen der Punkte für die Gleichungen ε) bis μ) in sehr guter Uebereinstimmung mit den Gleichungen α) bis δ), wie die kleinen Abweichungen der Striche bei ϑ, $\varkappa$, λ, μ von den Schnittpunkten zeigen.

In Bezug auf Farbenton und Farbennüance ordnen sich nun die Pigmentfarben meiner Maxwell'schen Scheiben folgendermassen: Nehmen wir W als Centrum, schlagen mit dem Radius WB Figur 64 einen Kreis und ziehen die Linien WR, WOr, WG, WGr, WVi bis an die Peripherie des Kreises, so werden die Farbentondifferenzen durch die Winkel, welche die Farbenlinien

mit einander bilden, oder durch die Bogenlängen ausgedrückt. Streckt man die Kreislinie zu einer geraden Linie, so erhält man eine mit dem prismatischen Farbenspectrum vergleichbare Anordnung der Farbentöne, und ein Vergleich der Abstände der Principalfarben auf dieser Linie mit dem Helmholtz'schen Spectrum (Physiologische Optik Taf. IV. Figur 1) zeigt eine grosse Uebereinstimmung beider, nur liegen Roth und Orange bei mir näher aneinander, ebenso Blau und Grün, während Grün und Gelb weiter von einander gerückt sind.

Die Farbennüance der Pigmente wird ferner bestimmt durch die Lage der gefundenen Punkte auf den Radien: je mehr Weiss oder Grau in einem Pigmente enthalten ist, um so näher liegt der Punkt für dasselbe nach W hin; das aus Orange und Grün gemischte Gelb ($\varkappa$) liegt näher an W als das Chromgelb G; das aus Roth und Grün gemischte Gelb (ϑ) liegt noch näher nach W hin, als $\varkappa$, und erscheint auch sehr viel weniger gelb und mehr grau.

Wir können somit für ein gegebenes Pigment mittelst des Farbenkreisels von Maxwell seinen Farbenton und seine Farbennüance bestimmen — indess ist die Bestimmung nur relativ zu den als Grundfarben gewählten Pigmenten, hängt ab von der Beleuchtung (man erhält z. B. ganz andere Gleichungen bei Tageslicht, als bei Lampenlicht), von der Helligkeit und Reinheit des angewendeten weissen Papiers und von der Genauigkeit der Einstellung oder der empfundenen Gleichheit des aus Farben und des aus Weiss und Schwarz zusammengesetzten Kranzes.

§ 37. Das prismatische Spectrum. Helligkeit der Farben. — Helmholtz (Müller's Archiv 1852, p. 481) und besonders Grassmann (Poggendorff's Annalen 1853, Bd. 89, p. 70) haben darauf aufmerksam gemacht, dass nicht sämmtliche Farbentöne, welche wir empfinden können, im prismatischen Spectrum enthalten sind, sondern dass die Uebergänge von Violett zu Roth, welche sie »Purpur« nennen, in demselben fehlen. Durch Mischung violetter und rother Strahlen können diese Töne erhalten werden: sie liegen auf der Farbentafel zwischen Roth und Blau und können durch Mischung dieser beiden Farben gewonnen werden, ebenso wie die Empfindung von Violett aus der Mischung von Roth und Blau gewonnen werden kann, wenn demselben allerdings auch noch Grau beigegeben ist, weshalb es Helmholtz als Rosa von Purpur unterscheidet. — Anderseits sind Strahlen von geringerer Brechbarkeit als diejenigen, welche wir als roth empfinden, und Strahlen von grösserer Brechbarkeit als die violetten im Spectrum vorhanden. Die jenseits des Violett gelegenen übervioletten Strahlen haben Stokes (Philos. Transactions 1852, p. 558) und Helmholtz (Poggendorff's Annalen 1855, Bd. 94, p. 205 und Physiol. Optik p. 234) sichtbar gemacht, und zwar Helmholtz, indem er Bergkrystallprismen benutzte, welche die übervioletten oder ultravioletten Strahlen in geringerem Grade absorbiren, wie Glasprismen, und indem er alles andere Licht sorgfältig ausschloss: das übervioletle Licht wurde dann als bläulich-weissgrau oder lavendelgrau empfunden. Helmholtz hat die Farbe auf Tafel IV. Figur 1 dargestellt. Helmholtz vermuthet indess, dass diese Farbe zum Theil von dem grünlichen Weiss, in welchem die Netzhaut fluorescirt, herrühre, und von einer nicht fluorescirenden Netzhaut reines Violett empfunden werden würde. Da dieser bedeutende Theil des Spectrums so gut wie gar nicht, der unterhalb des Roth gar nicht von der Sehsubstanz empfunden werden kann, so folgt daraus eine erhebliche Incongruenz zwischen

dem objectiv vorhandenen Lichte und den Lichtempfindungen unserer Sehsubstanz und es scheint darnach auch gerechtfertigt und gefordert, die Licht- und Farbenempfindungen möglichst unabhängig von objectiv vorhandenen Verhältnissen als selbstständige physiologische Vorgänge zu untersuchen.

Im Speciellen ist zu berücksichtigen, dass das eigentliche Roth im Spectrum sehr schmal ist, wie Hering (Wiener Akademie-Berichte 1874, Bd. 69, III. § 42) bemerkt, und der gewöhnlich als Spectralroth genommene Farbenton viel Gelb enthält: davon kommt wohl das Auftreten von Gelb, wenn prismatisches Roth und prismatisches Grün gemischt werden. — Ferner werden wir aus der Lage des Violett im Spectrum keinen Grund entnehmen können, dasselbe als eine einer reinen principalen Empfindung entsprechende Farbe anzusehen, da es vielmehr den Eindruck einer Mischung, *in welcher zugleich Blau und Roth empfunden wird*, macht. Denselben Eindruck machen die Farbentöne zwischen Roth und Gelb, Gelb und Grün, Grün und Blau, *dass durch sie je zwei Principalempfindungen* erregt werden, wie wir das ja auch sprachlich ausdrücken.

Ich hebe in dieser Beziehung noch hervor, dass wir die Farbentöne zwischen Grün und Blau zum Theil als Cyanblau oder *Hellblau* bezeichnen und anderseits *Hellblau* als eine Mischung von *Weiss* und Blau anzusehen pflegen. Volles Blau und Weiss gemischt geben aber eine ganz andere Empfindung als die des Hellblau, als dessen Repräsentanten wir die Farbe des blauen Himmels in unsern Breitegraden ansehen können (Helmholtz, Physiol. Optik p. 227), nämlich die Empfindung eines weisslichen Violett. Wenn wir z. B. eine weisse Scheibe mit blauem Sector von etwa 60° schnell rotiren lassen, so erscheint sie stark *röthlich* blau (Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 137). Auch Brücke (Wiener Akademie-Berichte 1865, Bd. 51, Aprilheft, p. 10 der Abhandlung) hat diese Beobachtung bestätigt. Ich habe diese Erscheinung dahin erklärt, dass wir eine falsche Ansicht von dem Hellblau haben, indem wir dies nicht als Grünblau, sondern als Weissblau ansehen, und dann consequent eine Mischung aus Weiss und Blau für röthliches Blau halten müssen — ebenso, wie wenn wir ein helles Grün für Weiss zu halten veranlasst werden, wir dann ein wirkliches Weiss für röthliches Weiss erklären würden. Brücke stimmt dieser Erklärung bei unter der weiteren Annahme, dass die Veränderung des Ultramarinblau durch Zusatz von Weiss daher rührte, dass das Tageslicht nicht weiss, sondern hellroth sei, in Folge der Beimischung des durch die Sclerotica eindringenden rothen Lichtes. Mit Brücke's Annahme erklärt sich zugleich die von mir (l. c.) gemachte, von Brücke bestätigte und erweiterte Beobachtung, dass Orange mit Weiss gemischt mehr nach Roth hin verschoben wird.

Die einzelnen Farbentöne des Spectrums haben verschiedene Helligkeiten. Schon Newton (Opticks Book I. Prop. VII. Theor. VI. Ausgabe von 1717, p. 85) sagt: *it is to be noted, that the most luminous of the prismatick Colours are the yellow and orange. These affect the Senses more strongly than all the rest together. and next to these in strength are the red and green. The blue compared with these is a faint and dark colour, and the indigo and violet are much darker and fainter.* — Es ist aber die Frage, ob die Empfindung, welche ein Farbenton, z. B. Roth, erregt, eben so stark ist, wie diejenige, welche ein anderer Farbenton, z. B. Gelb oder Blau, bei gleicher objectiver Lichtstärke hervorbringt, ob also die verschiedene Intensität der Empfindung für die verschiedenen Farbentöne des Spectrums von objectiven Verhältnissen abhängig ist.

Es liegen zunächst Beobachtungen über die Helligkeiten der verschiedenen Abtheilungen des Spectrums vom Roth bis zum Violett vor im Vergleich mit farb-

osem Lichte von gewisser Helligkeit. Frauenhofer machte Bestimmungen über lie Helligkeiten der Farbentöne des Sonnenspectrums (Denkschriften der Bayrischen Akademie München 1815, p. 193), indem er die Helligkeit der Farben verglich nit der Helligkeit eines durch eine kleine Flamme erleuchteten Spiegels. Frauenhofer hat trotz der offenbaren Unvollkommenheit dieser Methode Zahlen erhalten, velche von den mittelst einer viel vollkommneren Methode von Vierordt gewonnenen Werthen nicht sehr differiren. Vierordt (Anwendung des Spectralapparates zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes. Tübingen 1871) geht von dem Gedanken aus, dass einer sehr intensiven Farbe eine grössere Menge von Weiss zugesetzt werden kann, ohne dieselbe merklich zu verändern, als einer weniger intensiven Farbe. Auf das durch einen Spectralapparat entworfene Spectrum leitet Vierordt durch eine horizontale Spalte einen Streifen veissen Lichtes, welcher das Spectrum quer durchschneidet. Wird nun durch Abschwächung des weissen Lichtes die Lichtstärke des Streifens gemindert, so rhält letzterer einen schwachen Anflug von den benachbarten Spectralfarben — geht die Minderung des weissen Lichtes noch weiter, so werden die Farben des Streifens immer mehr gesättigt, bis schliesslich die von den reinen Spectralfarben rleuchteten Stellen des Sehfeldes nicht mehr unterschieden werden können von ler durch das abgeschwächte Weiss und die Spectralfarben zugleich erleuchteten Stelle.« Dieser Punkt tritt bei den verschiedenen Spectralfarben bei sehr verchiedenen Graden der Verdunkelung ein. Die Abschwächung des weissen Lichtes bewirkt Vierordt durch photometrisch bestimmte Rauchgläser (*smokelasses*). Indem wir wegen der Anordnung, der Zuverlässigkeit der Apparate und Beobachtungen, der Vorsichtsmassregeln auf Vierordt's Werk verweisen, eben wir in der folgenden Tabelle eine Uebersicht der photometrischen Bestimmungen Frauenhofer's und Vierordt's für Sonnenlicht, diffuses Tageslicht, Gaslicht und Petroleumlicht, indem die grösste Helligkeit des Gelb zwischen den Frauenhofer'schen Linien D und $E = 1000$ gesetzt ist.

Tabelle XVI.

	Sonnenlicht.		Diffuses Tageslicht.	Gaslicht.	Petroleum.
	Frauenhofer.	Vierordt.			
Roth B	32	22		200	18
Orange C	94	128	9	280	67
Röthlichgelb D	640	780	725	1550	988
Gelb D—E	1000	1000	1000	1000	1000
Grün E	480	370			
Blaugrün F	170	128	355	200	164
Blau G	31	8	119	90	21
Violett H	5,6	0,7	17	6	1,2

Da es sich in Vierordt's Beobachtungen um einen Vergleich von reinen und on mit Weiss bis zur Ebenmerklichkeit gemischten Farbentönen des Spectrums andelt, so können die Beobachtungen ebenso wenig wie die Frauenhofer's als Bestimmungen der objectiven Helligkeiten in dem Sinne gelten, wie wir etwa urch Annäherung eines Lichtes an eine Fläche dieselbe als objectiv erhellt anehen. Anderseits sind Vierordt's Beobachtungen insofern weniger subjectiv, als

die von Fraunhofer, als es sich nicht um einfache Schätzungen, sondern um di Bestimmung von eben merklichen Unterschieden vergleichbarer Objecte handelt — In wie weit aber die verschiedene Helligkeit der Abtheilungen des Spectrum auf Lichtmengen, und in wie weit sie auf grösserer oder geringerer Erregbarke für die eine oder andere Farbenart beruht, scheint für die reinen Spectralfarbe nicht ermittelt zu sein.

§ 38. Unterschiedsempfindlichkeit für Farbentöne und Farbenintensitäten. — Nachdem ich versucht hatte, mittelst rotirender Schei ben für Pigmentfarben die Unterschiedsempfindlichkeit für Farbentöne zu be stimmen (Physiologie der Netzhaut p. 151) und gefunden, dass der Farbento des Ultramarinblau durch Zusatz von $\frac{1}{360}$ Orange verändert wird, für ander Farben aber grössere Zusätze erforderlich sind, haben mehrere Schüler vo Helmholtz unter dessen Leitung sehr genaue Untersuchungen über die Unter scheidbarkeit von Farbentönen des Spectrums angestellt. Mandelstamm (A. f. O XIII. 2, p. 399) und Dobrowolsky (A. f. O. XVIII. 1, p. 66) bedienten sich z ihren Bestimmungen der Methode, dass sie das Sonnenspectrum durch die Oph thalmometerplatten hindurch beobachteten und durch Drehung derselben ein Verdoppelung derselben und Verschiebung im Gesichtsfelde nach rechts und link hin bewirkten. Es erscheinen dann nebeneinander zwei verschiedene Farben töne im Gesichtsfelde und es werden nun die Ophthalmometerplatten so lang gedreht, bis ein minimaler, eben noch merklicher Unterschied zwischen de beiden Farbentönen wahrgenommen werden kann. Aus dem Drehungswink der Ophthalmometerplatten kann dann die lineare Verschiebung des Spectrum berechnet werden (s. § 4), und aus dieser, den Werthen für die Wellenlänge der Frauenhofer'schen Linien, welche eingestellt wurden, und den Abständen de Frauenhofer'schen Linien von einander lässt sich dann der Bruchtheil bestimmen welcher zur Wellenlänge der gegebenen Farbe selbst hinzukommen muss, dami ein Wechsel im Farbentone der betreffenden Farbe wahrgenommen werde.

Die Beobachtungen ergeben, dass die grösste Empfindlichkeit für Unterschiede im Farbentone im Gelb (D), demnächst im Cyanblau (F), dann im Blau grün (zwischen E und F) liegt; erheblich geringer wird die Unterschiedsempfind lichkeit für indigblaue Farbentöne (G) für Grün, Violett, und am geringsten ist si für Roth. Dobrowolsky hat dieselbe Reihenfolge, aber absolut viel grösser Empfindlichkeit gefunden, wie Mandelstamm, zum Theil wohl durch Verbesserun der Methode, namentlich Ausschluss von Helligkeitsdifferenzen (A. f. O. XVIII. 1 p. 102).

Für Linie	B	C	$C—D$	D	$D—E$	E
Unterschiedsempfindlichkeit	$\frac{1}{115}$	$\frac{1}{167}$	$\frac{1}{331}$	$\frac{1}{772}$	$\frac{1}{246}$	$\frac{1}{340}$
Für Linie	$E—F$	F	G	$G—H$		
Unterschiedsempfindlichkeit	$\frac{1}{615}$	$\frac{1}{740}$	$\frac{1}{272}$	$\frac{1}{146}$		

Dobrowolsky macht darauf aufmerksam, dass in Uebereinstimmung mi diesen Resultaten in der Mitte des Sonnenspectrums der Farbenton sehr schnel wechselt, im Roth und Violett dagegen die Farbentöne sehr langsam und kaum merklich in einander übergehen.

Es sind ferner von LAMANSKY (A. f. O. XVII. 1, p. 123) und von DOBROWOLSKY (A. f. O. XVIII. 1, p. 74) Untersuchungen über die Empfindlichkeit für Helligkeitsunterschiede der Spectralfarben angestellt worden, indem für die einzelnen Farbentöne ermittelt wurde, eine wie grosse Helligkeitsdifferenz eben noch empfunden werden kann. Wir haben in § 25 gesehen, dass für weisses Licht die Unterschiedsempfindlichkeit bis $\frac{1}{186}$ steigen kann, mit Abnahme der absoluten Helligkeit aber sinkt.

LAMANSKY und DOBROWOLSKY haben gleichfalls gefunden, dass für alle Farben die Unterschiedsempfindlichkeit auch zunimmt mit der Zunahme der Intensität des objectiven farbigen Lichtes bis zu einer gewissen Grenze, von wo an sie wieder abnimmt. LAMANSKY findet nun die Unterschiedsempfindlichkeit für Gelb und Grün $= \frac{1}{286}$, für Blau $\frac{1}{212}$, also grösser, wie für Weiss — für Violett $\frac{1}{106}$, für Orange $\frac{1}{78}$, für Roth $\frac{1}{70}$, also kleiner, als für Weiss. DOBROWOLSKY findet nach einer anderen Methode (s. Chromatoptometrie von SNELLEN und LANDOLT dieses Handbuch Bd. III. p. 47) hiervon sehr abweichende Werthe und zwar

Tabelle XVII.

Farbe.	Frauenhofer'sche Linie.	Empfindlichkeit.
	A	$\frac{1}{14}$
Roth	*B*	$\frac{1}{20}$
	C	$\frac{1}{25}$
Orange	*C—D*	$\frac{1}{33}$
Goldgelb	*D*	$\frac{1}{46}$
Grün	*D—E*	$\frac{1}{59}$
Blaugrün	*E—b*	$\frac{1}{67}$
Cyanblau	*F*	$\frac{1}{132}$
Indigo	bei *G*	$\frac{1}{268}$
Violett	*G—H*	$\frac{1}{268}$
-	*H*	$\frac{1}{67,33}$

DOBROWOLSKY's Unterschiedsempfindlichkeit für Weiss ist $= \frac{1}{166}$; er lässt es aber zweifelhaft, ob er für jede Spectralfarbe die absoluten Grenzwerthe wirklich erreicht habe (l. c. p. 84—86). — Bei DOBROWOLSKY würden also nur für die Farbentöne des Indigo und Violett grössere Unterschiedsempfindlichkeiten als für Weiss vorhanden sein.

§ 39. Unterschiedsempfindlichkeit für Farbennüancen. — Bezeichnen wir die Mischung eines Farbentones oder eines Pigmentes mit Weiss, Grau oder Schwarz als Farbennüance, so erhalten wir auch hier verschiedene

Mischungen, deren Unterschiede empfunden werden. Die Grenze für die Empfindlichkeit des Auges gegen Farbennüancen habe ich zuerst zu bestimmen gesucht, indem ich farbige Sectoren auf weissen oder dunkelgrauen Scheiben, oder weisse Sectorabschnitte auf farbigen Scheiben anbrachte und bestimmte, bei welcher Menge der beigemischten Farbe oder des beigemischten Weiss ein Unterschied eben noch wahrgenommen werden könnte. (Physiologie der Netzhaut 1865 p. 138—150.) Ich habe mich dazu der rotirenden Masson-Maxwell'schen Scheibe bedient (s. Figur 50 *B* § 25), und gefunden, 1) dass auf einer weissen Scheibe ein farbiger Sector (Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau) immer erkannt wird, wenn derselbe 3° beträgt, in der Mehrzahl der Fälle sogar, wenn er 2° beträgt (s. Phys. d. Netzh. Tabelle XXI, p. 139); die Unterschiedsempfindlichkeit würde demnach $\frac{1}{120}$ bis $\frac{1}{180}$ betragen; 2) dass auf einer dunkelgrauen (schwarzen Papier-) Scheibe ein Sector von 1° immer einen deutlichen farbigen Kranz bildet (Roth, Orange und Blau), ohne dass damit die Grenze für die Erkennbarkeit erreicht worden war; 3) dass ein farbiger Sectorabschnitt dieser Pigmente als farbiger Kranz erschien, wenn für 1° Orange dem Schwarz des Grundes 105° Weiss, für 1° Roth 38° Weiss, für 1° Blau 29° Weiss zugesetzt, damit also der Grund der Scheibe bedeutend heller gemacht wurde; 4) dass ein Kranz von verschiedener Nüance noch erkannt werden kann, wenn der Kranz aus 106° Orange und 254° Schwarz, der Grund der Scheibe aus 105° Orange und 255° Schwarz zusammengesetzt ist, ferner bei 61° Roth und 299° Schwarz für den Kranz und 60° Roth 300° Schwarz für den Grund — bei 66° Blau und 294° Schwarz und 65° Blau und 295° Schwarz für den Grund der Scheibe. — Woinow (A. f. O. 1870, XVI 1, p. 256) hat diese Versuche auf Helmholtz' Anregung und unter seiner Leitung wiederholt, und im Wesentlichen meine Erfahrungen bestätigt, ohne, wie es scheint, dieselben gekannt zu haben. Auf einer schwarzen Scheibe genügte für sein Roth ein Sector von 48′, für Orange 42′, für Blau 54′ — auf einer weissen Scheibe musste der Sector von Roth 3° 11′ von Orange 2° 57′, von Blau 2° 32′ betragen, auf einer hellgrauen Scheibe etwas weniger, auf einer dunkelgrauen Scheibe Roth etwas mehr, Orange und Blau noch weniger. — Auch J. J. Müller (A. f. O. XV. 2, p. 243) scheint ähnliche Resultate erhalten zu haben.

Aus den Untersuchungen dieses und des vorhergehenden Paragraphen ergiebt sich, dass wir befähigt sind, eine ganz ausserordentlich grosse Anzahl von Färbungen zu unterscheiden, da jeder Farbenton, welcher unterschieden werden kann, nach seiner Intensität in sehr weitem Umfange verschieden sein, und die Töne und Intensitäten wiederum in alle möglichen Nüancirungen verändert werden können. Die Zahl der Farbenempfindungen, die wir unterscheiden können, müssen wir wenigstens auf viele Millionen berechnen.

§ 40. Einfluss der Helligkeit auf die Farbenempfindung. — Dass Pigmente bei verminderter Beleuchtung, z. B. in der Dämmerung farblos erscheinen, hat schon Purkinje (Beiträge II. p. 109) angemerkt, auch ist es ihm schon aufgefallen, dass Blau bei geringerer Helligkeit sichtbar wurde, als Roth und Grün, was später auch wieder von Grailich (Wiener Akademie-Berichte 1854, Bd. 52, p. 252) erwähnt wurde. Ich (Physiologie der Netzhaut p. 125) habe verschiedene sehr lebhafte Pigmente bei schwacher Beleuchtung beobachtet,

ndem ich dieselben mittelst der Oeffnung quadratischer Diaphragmen (Figur 48 n § 25) im übrigens finstern Zimmer beleuchtete, den farbigen Flächen eine bestimmte Ausdehnung gab und sie theils auf schwarzem, theils auf weissem Grunde befestigte. Es hat sich dabei ergeben, dass Pigmente bei sehr verminderter Beleuchtung farblos erscheinen, aber sich durch grössere oder geringere Helligkeit von ihrer Umgebung unterscheiden.

Bei 10 Mm. Seite der quadratischen Lichtquelle des Diaphragmas erschienen Quadrate arbiger Pigmente unter einem Gesichtswinkel von etwa 35 Minuten folgendermassen:

Auf weissem Grunde:

1) Schwarz, Braun, Roth, Orange, Dunkelgrün erscheinen schwarz.
2) Blau erscheint etwas weniger tiefschwarz.
3) Grün und Hellblau bedeutend heller.
4) Rosa noch heller.
5) Gelb am hellsten.

Auf schwarzem Grunde:

1) Roth am dunkelsten, dann folgten allmälig immer heller erscheinend
2) Orange und Dunkelgrün,
3) Blau und Grau,
4) Grün und Hellblau,
5) Rosa und Gelb,
6) Weiss erschien bei weitem am hellsten.

Besonders auffallend ist hierbei der Unterschied des Zinnoberroth und des Ultramarinblau: letzteres erscheint sehr auffallend heller auf schwarzem Grunde als ersteres, ohne dass die geringste Farbe von demselben wahrgenommen werden konnte, während im diffusen vollen Tageslichte man das Blau eher für dunkler erklären würde, als das Roth. Um so wunderbarer erscheint es dem gegenüber, dass die Farbenempfindung beim Roth bei geringerer Helligkeit auftritt, als beim Blau.

Ausserdem ändert sich auch der Farbenton bei schwacher Beleuchtung: Roth (Zinnober) erscheint auf schwarzem wie auf weissem Grunde als ein schönes dunkles Braun; Orange sehr dunkel und rein roth; Gelb erscheint schmutzig grau mit einem Stiche ins Röthlichgelbe und ist bei einer gewissen Beleuchtungsintensität von Rosa nicht zu unterscheiden; Grün und Hellblau sehen ganz gleich aus; das volle Ultramarinblau sieht auf schwarzem Grunde etwa wie graublaues Actenpapier aus, auf weissem Grunde ist es sehr tief dunkelblau, mit einer eigenthümlichen, an Sammet erinnernden Weichheit der Oberfläche. Etwas andere Veränderungen giebt Hochecker (A. f. O. 1873, XIX. 3, p. 32) an, namentlich wird für Grün, Blau und Violett eine Empfindung von Grünlichgrau in verschiedenen Helligkeitsgraden angegeben.

Ausser der Umgebung des Pigmentes ist bei schwacher Beleuchtung von Einfluss auf die Farbenempfindung die Grösse oder der Gesichtswinkel derselben.

Den Einfluss des Gesichtswinkels auf die Wahrnehmung der Farbe werden wir im nächsten Paragraphen für die volle Beleuchtung durch diffuses Tageslicht besprechen — hier bemerke ich, dass in Bezug auf rothe und blaue Pigmente auf schwarzem Grunde das Verhältniss zwischen Gesichtswinkel und Beleuchtungsintensität sehr verschieden ist für eine eben merkliche Farbenempfindung.

Ich betrachtete rothe und blaue Quadrate aus gleicher Entfernung und vergrösserte al mälig die Oeffnung des quadratischen Diaphragmas, bis ich die Objecte farbig sah: die folgend Tabelle giebt die Lichtintensitäten und Gesichtswinkel (nach der Seite der Quadrate berechne an, unter denen die Quadrate farbig erschienen. Die Lichtintensität 1 entspricht einer Oeffnun des Diaphragmas von 40 Mm. Seite.

Tabelle XVIII.

Licht-intensitäten.	Gesichtswinkel	
	Rothe Quadrate.	Blaue Quadrate.
1	1° 13′ 22″	1° 13′ 22″
1,56	36′ 41″	—
1,96		36′ 41″
2,89	18′ 20″	
3,81	—	18′ 20″
6	9′ 10″	
7.84	—	9′ 10″
11,38	4′ 35″	
25	2′ 17″	6′ 53″

Mit Abnahme des Gesichtswinkels für die farbige Fläche muss also eine Zu nahme der Beleuchtungsintensität eintreten, wenn eine Farbenempfindung aus gelöst werden soll und die Zunahme der Beleuchtungsstärke muss grösser sei für Blau, als für Roth.

Bei diesen Versuchen ist der Umstand auffallend, dass die Farbe der Pigment bei schwächster Beleuchtung nur im ersten Momente des Anschauens empfunde wird, nach wenigen Sekunden aber ganz verschwindet, ohne dass sich die Sicht barkeit des Objectes ändert. Aehnliches hat Hering (Wiener Akademie-Bericht 1874, Bd. 69, III. Maiheft § 46) beobachtet; er findet auch für Spectralfarben dass wenn man eine Linie im Spectrum des zerstreuten Tageslichtes bei Abblen dung aller übrigen Farben fixirt, die Farbe zusehends verblasst. Verengt ma sodann den Spalt hinreichend, so schlägt, während die Spectrallinien noch deut licher werden, die fixirte Farbe in einen die Gegenfarbe mehr oder weniger deut lich enthaltenden Ton um. Ein kurzer Verschluss des Auges genügt, um nachhe die Farbe wieder zu sehen trotz der Lichtschwäche des Spectrums. — Der Er klärung Hering's, dass das Verschwinden der Farbenempfindung auf einer Ent wickelung der Gegenfarbe beruhe, kann ich nur beistimmen. Im Ganzen trete die Versuche bestätigend für den von Hering aufgestellten Satz ein, »dass di schwarz-weiss empfindende Substanz viel reichlicher im Sehorgan enthalten ist, als die roth-grün und die gelb-blau empfindende, und dass auch diese beide unter einander nicht gleich sind.« Wir werden weitere Bestätigungen hierfür in nächsten Paragraphen vorzubringen haben. Wegen des Näheren über die An stellung der Versuche und specielle Ergebnisse verweise ich auf meine Physio logie der Netzhaut p. 124—132.

Ich bemerke hierzu, dass nach diesen Versuchen auch das ganz normal Auge bei schwacher Beleuchtung farbenblind wird und die Versuche zur Be stätigung des früher von mir ausgesprochenen Satzes dienen, dass die Farben empfindlichkeit des normalen Auges nur quantitativ verschieden ist von de Farbenempfindlichkeit chromotopseudoptischer Augen.

Hieran schliesse ich die Mittheilung von Versuchen, welche Herr Dr. LANDOLT n Paris mir gütigst übergeben hat.

Herrn Dr. LANDOLT's Versuche über Farbenperception bei mini- nialer Beleuchtung und zunehmender Adaptation.

I.

An der Wand eines verdunkelten Zimmers werden eine Menge farbiger Quadrate von 2 Mm. Seite auf schwarzem Sammet angebracht. Ich hatte sie och nie gesehen und kannte ihre Anordnung nicht.

Erst sah ich davon gar nichts. Nach längerer Adaptation erscheinen mir inige als helle Flecke, die geradezu leuchten, wenn das Licht auf der *Fovea cen- ralis* benachbarte Retinaltheile fällt und das Auge daran vorbeisieht. (Es sind ie Farben gelb und grün, werden aber noch nicht als solche erkannt.) — Gleich arauf erkenne ich die gelben Quadrate als solche und hernach bekommen die rünen grünlichen Schein. Ihre Farbe ist nicht merklich intensiver beim Daran- orbeisehen, wohl aber ihre Helligkeit. Hierauf erscheinen eine Anzahl Quadrate unkel, unbestimmt, darnach dunkel rothbraun, endlich roth (sie sind dunkel- oth). — Später erst erkenne ich die blauen und zuletzt die violetten.

II. Herabgesetzte Beleuchtung.

Zwei Paare farbiger Quadrate von je 2 Mm. Seite und Distanz der Quadrate, on einander 50 Mm. entfernt, werden auf schwarzem Grunde, wie Figur 65 eigt, gruppirt.

Fixire ich bei minimaler Beleuchtung (d. h. bei so schwachem Lichte, dass erade noch Roth und Blau in seiner Farbe erkannt wird) auf 60—70 Ctm. Ab- and mit dem rechten Auge das lau, dann erscheint es mir bald unkel und verschwindet ganz, ucht wieder auf und verschwin- et wieder, um verschwunden zu eiben, um so sicherer, wenn ich ruhig den Zwischenraum zwischen beiden lauen Quadraten fixire. Zu gleicher Zeit wird auch das periphere Roth in Form nd Farbe undeutlicher. (Beide Farben, auch das Blau, werden sofort deutlich, enn ich nur wenig daran vorbei fixire.)

Fig. 65.

2 2 2 50 Mm.

Fixire ich dagegen das Roth, so erscheint es selbst deutlich roth und auch is Blau zu gleicher Zeit deutlich blau und bleibt so, ohne zu verschwinden. asselbe, wenn man den Sammet um 180° dreht, so dass die Stellung der Farbe echselt.

Mit einem Wort: kleine blaue Objecte erscheinen bei herabgesetzter Be- uchtung deutlicher in der Peripherie als im centralen Sehen, rothe umgekehrt.

Nehme ich zu den Versuchen dasselbe Roth, aber statt Blau intensives Hell- ün, dann scheint mir das Hellgrün in seiner richtigen Farbe, wenn ich es fixire, is Roth undeutlicher. Fixire ich das Roth, so scheint dieses deutlich, während h das Grün hell leuchten sehe, aber kaum als Grün erkenne. Aber Grün wie oth erscheint mir deutlicher beim directen Sehen.

Mache ich dieselben Versuche mit Violett und Hellgelb, so scheint bei mini- alem Lichte, wobei Violett kaum mehr als solches kennbar, das Violett bei

Fixation nur einen Moment in seiner Farbe, verschwindet dann; das Gelb z gleicher Zeit sehr hell, fast weisslich. — Fixire ich dagegen das Gelb, dann schei dieses deutlich. Zu gleicher Zeit erscheint auch Violett wieder hell und blei so, ist aber kaum als Farbe zu erkennen, jedenfalls nicht so gut als im erste Moment eigner Fixation. [Aehnlich verhält sich das Violett bei Prüfung des in directen Sehens, lange sehe ich eine Helle, ehe ich Violett als solches erkenne Nähere ich dagegen das Auge den Objecten, oder wird die Beleuchtung stärker dann sehe ich immer die Farbe saturirter, welche ich fixire, die andere undeut lich. — Violett erscheint mir auch bei Tageslicht blasser, wenn ich das Gel fixire und überhaupt, wenn ich daran vorbeisehe auf schwarzem Grunde. (Dies Versuche hat Prof. Donders mitgemacht, repetirt und dieselben Resultate ge funden.)

Dieselben farbigen Objecte auf weissem Grunde erscheinen immer bei directen Sehen heller und in ihrer wirklichen Farbe. — Fällt ihr Licht auf di Peripherie der Retina, so erscheinen mir alle dunkler und nicht in ihrer Farbe am wenigsten Orange und sehr helles Grün.

Endlich ist noch zu erwähnen, dass nach den Versuchen von Burckhard und Faber (Pflüger's Archiv für Physiologie Bd. II. 1869, p. 127) zur Auslösun einer minimalen Farbenempfindung die Intensität oder Helligkeit der Farbe zu nehmen muss, wenn die Dauer des Farbeneindrucks abnimmt. Burckhardt un Faber fanden, dass im Mittel für die verschiedenen Farbentöne die Lichtstärke fü Burckhardt 173 Mal, für Faber 513 Mal grösser sein musste, wenn der Eindruc 0,0029 Sekunden dauerte, als bei anhaltendem Betrachten der Farbe.

Burckhardt und Faber stellten ihre Versuche mit einer von Vierordt (l. c p. 121) construirten Pendelvorrichtung an, welche die genaue Bestimmung de Zeit, während welcher ein Object sichtbar ist, ermöglicht und auch Veränderunge der Zeit innerhalb gewisser Grenzen gestattet. Als Object dienten farbige Gläse vor einer durch Petroleumlicht von hinten beleuchteten Milchglasplatte vo variabler und messbarer Helligkeit, auf welche der Beobachter durch den 2 Mm breiten und 60 Mm. langen Spalt des Pendelapparates blickt. Einerseits wurde nun die Lichtintensitäten bestimmt, welche erforderlich waren, wenn bei dauern dem Lichteindruck die Farbe richtig erkannt werden sollte, anderseits die Licht intensitäten, welche der Milchglasplatte ertheilt werden mussten, wenn da Object 0,0029 bis 0,0144″ lang sichtbar wurde. Bei geringster Lichtstärke un geringster Reizdauer wurden noch erkannt Hellgelb, dann folgt Gelb, dann be

Burckhardt: Hellblau, Blau, Grün, Grasgrün, Violett, Roth; bei
Faber: Blau, Grün, Grasgrün, Hellblau, Roth, Violett.

§ 41. **Einfluss des Gesichtswinkels auf die Farbenempfin dung beim directen Sehen.** — Die Erfahrung der Astronomen, dass Fix sterne, also Objecte ohne scheinbaren Durchmesser, farbig erscheinen können beweist, dass die Grösse des Objectes für die Farbenempfindung nicht allein mass gebend ist, dass ausserdem auch die Helligkeit oder die Intensität der Farbe zu berücksichtigen ist.

Struve (Mensurae micrometricae stellarum compositarum 1837) sagt in dieser Beziehun p. 75: *In stellis minimis colores ob debilitatem evanescunt. Ordo stellarum nonus in mea nota tione postremus videtur esse, in quo colores sine dubitatione possunt percipi.* Struve hat abe

usserdem noch gefunden, dass die farbig erscheinenden Sterne zugleich auch weisses Licht usstrahlen, also nicht einmal die denkbar günstigsten Verhältnisse für die Erregung der 'arbenempfindung bei ihnen gegeben sind. Struve sagt hierüber p. 74: *Si stella splendida rubra horizonti est vicina, imaginem videmus prismaticam, quae omnes exhibet colores, in qua ero color ruber est maioris intensitatis, quam in imagine stellae albae — simili modo stella aerulea imaginem offert, in qua caeruleus praevalet color... Ex qua experientia probabile fit, nullas in coelo esse stellas, quae singulum offerant colorem prismaticum, sed omnes olores in omnibus esse conjunctos, ita tamen ut aequilibrium colorum, ut ita dicam, non semper ervetur.*

Schon Purkinje (Commentatio de examine organi visus etc. Breslau [Habilitationsschrift ur Professur] 1823, p. 15) hat darauf aufmerksam gemacht, dass für die Wahrnehmbarkeit ler Farben Gesichtswinkel und Intensität in Betracht kommen: *sensibilitas oculi in specificam oloris cuiusdam qualitatem ad diversas distantias et sub certis gradibus luminis xaminari poterit; nam notum est, qualitatem illam colorum in obiectis affatim minutis ad ustas distantias evanescere.*

Der erste, welcher das Verschwinden der Färbung bei sehr kleinem Gesichtswinkel beobachtet hat, scheint Plateau (Poggendorff's Annalen 1830, Bd. 20, p. 327) zu sein, welcher angiebt, dass farbige Quadrate von 1 Centimeter Seite hm in einer gewissen Entfernung nur als eine kleine, kaum wahrnehmbare Wolke erschienen seien. Ferner bemerkt Valentin (Lehrbuch der Physiologie 1848, II^{b}. p. 154): »die Farbe des Gegenstandes verschwand früher, als das Bild desselben« und ähnliches hat E. H. Weber (Müller's Archiv 1849, p. 279) bemerkt.

Ich (Abhandlungen der Schlesischen Gesellschaft, Breslau 1861, p. 74, und Moleschott's Untersuchungen VIII. p. 275) habe besondere Versuchsreihen über lie Wahrnehmbarkeit der Farbe im Vergleich mit der Wahrnehmbarkeit des arbigen Objectes überhaupt angestellt, indem ich farbige Doppelquadrate von je 10 Mm. Seite und gleicher Distanz von einander im diffusen, aber recht hellen Tageslichte aufstellte und mich von denselben immer mehr entfernte, oder aus einer Entfernung, in welcher ich von den Objecten nichts sehen konnte, mich denselben ganz allmälig näherte und die Entfernung ablas, in welcher ich die Objecte ungefärbt und in welcher ich sie farbig sah. Es ist bei diesen Versuchen sehr auffallend und für die Bestimmung der Grenze der Farbenempfindung oft störend, dass die Pigmente unter sehr kleinem Gesichtswinkel in anderem Farbenone und anderer Nüance erscheinen: Orange erscheint immer farbig, aber bei 39″ roth, bei 59″ orange, Roth auf schwarzem Grunde bei 59″ gleichfalls roth, auf weissem Grunde bei 59″ schwarz, bei 1′ 43″ farbig, Ultramarinblau auf schwarzem Grunde bei 1′ 14″ grau, bei 4′ 17″ blau, auf weissem Grunde bei ′ 8″ schwarz, erst bei 5′ 43″ blau, Hellblau und Hellgrün erscheinen bei 1′ 8″ beide gleich grau, hell auf schwarzem, dunkel auf weissem Grunde, erst bei etwa 2′ können sie als blau und grün unterschieden werden, bei 1′ 49″ erschien Hellblau auf weissem Grunde tief dunkelblau.

Herr Dr. Landolt theilt mir über den Eindruck kleiner farbiger Objecte bei allmäliger Annäherung Folgendes mit:

Auf weissem Grunde farbige Quadrate von 2 Mm. Seite. Helles, nicht blendendes Tageslicht.

In der Ferne erscheinen mir alle dunkel, einige schwarz. Nähere ich mich,

dann werden heller Orange und Grün, aber noch nicht als solche erkannt Erst wird erkannt Orange, dann Hellgrün, hierauf Roth (dunkel), es wa erst schwarz. Lange nachher, d. h. bei stärkerer Annäherung erst erkenne ic blau und fast gleichzeitig (vielleicht *per exclusionem*) Violett.

Ich habe später (Physiologie der Netzhaut p. 115) noch Versuche in de Weise ausgeführt, dass ich farbige Quadrate von 2 Mm. Seite beobachtete, inden ich die Augen durch eine schwarze Maske mit geschwärzten Röhren vor dem Aug vor dem Eindringen des diffusen Lichtes von den Seiten her schützte und hab dann unter erheblich kleineren Gesichtswinkeln die Objecte sichtbar und be Vergrösserung der Gesichtswinkel farbig erscheinen sehen.

Zu wesentlich gleichen Resultaten ist v. Wittich (Königsberger medicinisch Jahrbücher 1864, Bd. IV, p. 37) in sehr ausgedehnten Versuchsreihen gekommen in welchen sich derselbe ausserdem die Aufgabe stellte, zu untersuchen, wie sic die Sichtbarkeit und Farbenwahrnehmung von Objecten bei minimalem Gesichts-winkel verhielte, wenn sie dauernd und wenn sie nur momentan gesehe würden. Ich gebe die Resultate der von Wittich'schen Beobachtungen i Tabelle XIX auf Winkelgrössen berechnet, um sie mit meinen Angaben ver-gleichbar zu machen.

Tabelle XIX.

Grössen der farbigen Quadrate = 2 Mm. Seite. (Hellwolkiger Vormittag.)

Farbe der Quadrate.	Momentane Betrachtung		Dauernde Betrachtung	
	sichtbar.	farbig.	sichtbar.	farbig.
Schwarzer Grund.				
Roth	1′ 23″	1′ 58″	—	1′ 4″
Orange	1′ 4″	1′ 32″	—	1′ 4″
Gelborange	1′ 9″	1′ 32″	—	1′ 14″
Gelb	1′ 23″	1′ 23″	—	1′ 4″
Hellgrün	1′ 23″	1′ 43″	1′ 4″	1′ 43″
Dunkelgrün	2′ 17″	6′ 53″	2′ 17″	3′ 16″
Hellblau	1′ 14″	2′ 17″	1′ 14″	1′ 43″
Dunkelblau	2′ 17″	7′ 38″	1′ 58″	3′ 26″
Rosa	1′ 14″	2′ 17″	—	1′ 32″
Violett	1′ 43″	6′ 53″	—	3′ 26″
Weisser Grund.				
Roth	1′ 23″	6′ 53″	1′ 9″	2′ 50″
Orange	1′ 43″	3′ 8″	1′ 4″	1′ 32″
Gelborange	2′ 17″	5′ 43″	2′ 17″	2′ 50″
Gelb	—	6′ 53″	—	3′ 26″
Hellgrün	2′ 17″	3′ 26″	—	1′ 43″
Dunkelgrün	1′ 23″	13′ 46″	—	13′ 46″
Hellblau	1′ 23″	4′ 35″	1′ 9″	1′ 43″ (2′ 17″)
Dunkelblau	1′ 23″	5′ 17″	1′ 4″	2′ 17″
Rosa	1′ 43″	4′ 35″	1′ 9″	2′ 50″
Violett	1′ 32″	13′ 46″	1′ 9″	5′ 43″

Allerdings differiren in v. Wittich's und meinen Bestimmungen die Zahlen sehr erheblich, indess ist das auch der Fall bei meinen Beobachtungen, wenn ich sie unter einander vergleiche, und ebenso in v. Wittich's Beobachtungen unter einander verglichen; dies rührt zum Theil von der Beleuchtung, den angewendeten Pigmenten und dergleichen her, zum grösseren Theile aber wohl von der subjectiven Unsicherheit über die äusserste Grenze, welche man für die Wahrnehmbarkeit setzt. Dazu kommt der Umstand, den auch v. Wittich hervorhebt, dass sich bei sehr kleinen Gesichtswinkeln Farbenton und Farbennüance verändern.

Plateau's Ausdruck, dass die farbigen Objecte schliesslich »als eine kleine, kaum wahrnehmbare Wolke« erscheinen, ist sehr treffend, denn erstens ist von einer Form des Objectes nichts zu erkennen, und zweitens erkennt man das Object nur auf Augenblicke beim scharfen Fixiren. Auch die Färbung ist immer nur auf Augenblicke und bei Bewegungen der Augen oder des Kopfes erkennbar — will man das Object festhalten, so wird es sogleich farblos. Auch dies ist in Uebereinstimmung mit Beobachtungen v. Wittich's, in denen er (l. c. p. 50) farbige Fäden sich bewegend und ruhend aus gewissen Entfernungen sah: die sich bewegenden Fäden wurden aus viel grösserer Entfernung als farbig erkannt.

Die bisherigen Erfahrungen lassen sich nun etwa so zusammenfassen:

1) die meisten Pigmentfarben erscheinen bei voller Tagesbeleuchtung auf schwarzem oder weissem Grunde unter kleinstem Gesichtswinkel farblos, als helle bezw. dunkle Flecke;

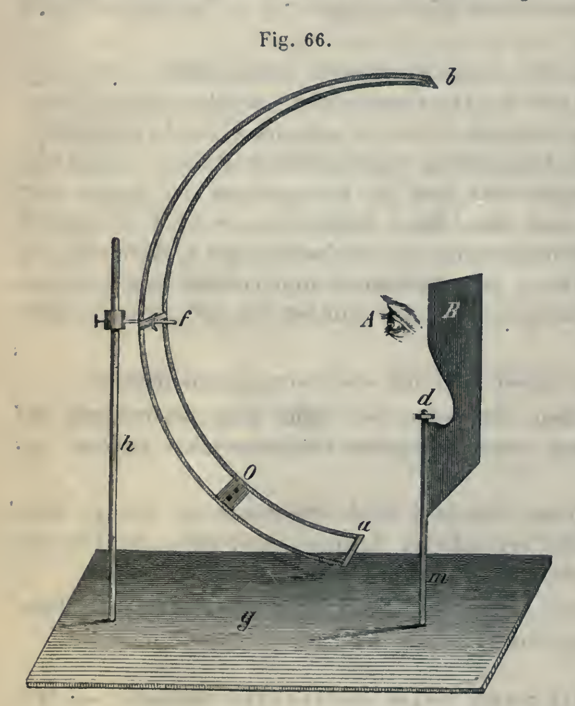
2) bei etwas weniger kleinem Gesichtswinkel erscheinen sie farbig, aber mit verändertem Farbentone und veränderter Nüance, und zwar dunkler auf hellem, heller auf dunklem Grunde;

3) die Principalfarben Roth, Grün, Gelb und Blau zeigen sehr erhebliche quantitative Differenzen in Bezug auf Erregung der Farbenempfindung.

§ 42. Die Farbenempfindung beim indirecten Sehen. — Wie beim Fixiren eines farbigen Objectes oder dem Betrachten mit der *Fovea centralis* der Netzhaut die Farbenempfindung bedingt ist durch eine gewisse scheinbare Grösse und Helligkeit des Objectes, so finden wir auch für die peripherischen Theile der Netzhaut, dass farbige Objecte unter gewissen Gesichtswinkeln farblos erscheinen. Dass indirect gesehene Objecte farblos erscheinen, hat zuerst Troxler (Himly und Schmidt's Ophthalmologische Bibliothek 1802, II, Stück 2, p. 51), dann Purkinje (Beiträge zur Kenntniss des Sehens I. p. 76 und II. p. 14) und Hueck (Müller's Archiv 1840, p. 95) bemerkt. Später habe ich (A. f. O. 1857. III. 2, p. 38) ausführliche messende Versuche über die Farbenempfindung beim indirecten Sehen angestellt, welche dann mit mancherlei Modificationen aber nach wesentlich derselben Methode von Schelske (A. f. O. 1863, IX. 3, p. 39. cf. III. 1, p. 68 dieses Handbuchs), Woinow (A. f. O. 1870, XVI. 1, p. 212), Raehlmann (Ueber Farbenempfindung in den peripherischen Netzhautpartien. Diss. inaug. Halle 1872), Brisewitz (Ueber das Farbensehen etc. Diss. inaug. Greifswald 1872), Schirmer (A. f. O. 1873, XIX. 2, p. 194), Landolt (Il Perimetro in Quaglino Annali d'Ottalmologia 1871, p. 1 und Annales d'Oculistique 1874, p. 1.

cf. III. dieses Handbuches p. 67), Reich (Klinische Monatsblätter 1874, p. 247) fortgesetzt und erweitert, auch auf pathologische Augen ausgedehnt worden sind. — Ich habe mich zuerst einer Vorrichtung zu diesen Untersuchungen bedient, welche später von Förster (Möser, Das Perimeter und seine Anwendung. Diss. inaug. 1869) den Namen Perimeter erhalten hat. Der Apparat besteht aus einem Halbkreise mit Gradtheilung *afb* Figur 66, in welchem die Objecte *O* vom Centrum nach der Peripherie und umgekehrt verschoben werden können, während das im Mittelpunkte des Halbkreises befindliche Auge des Beobachters *A* den Punkt *f* unverrückt fixirt. Der Schirm *B* mit dem Ausschnitte *d* für die Nase des Beobachters ist um seine Axe *m* drehbar und dient zur Verdeckung des andern Auges. Der Halbkreis ist nach oben und unten verschiebbar an der Stahlstange *h* und drehbar um die Axe *f*. Das auf einem weissen oder schwarzen Papiercarton angebrachte farbige Quadrat in *O* wird bei den Beobachtungen lateralwärts oder medianwärts so weit geschoben, bis keine Färbung mehr wahrgenommen werden kann, bezw. bis eine Spur von Färbung bemerkt werden kann. Durch Drehungen des Halbkreises um die Axe bei *f* ist es möglich, denselben für die verschiedenen Meridiane der Netzhaut einzustellen und die Grenzen der Farbenempfindung in den verschiedenen Meridianen zu untersuchen. — Die Beschreibung anderer Perimeter s. bei Snellen und Landolt, dieses Handbuch III. 1, p. 56 u. f.*)

Fig. 66.



Die Werthe, welche ich bei meinen Untersuchungen gefunden habe, sind auf den beiden folgenden Tabellen (S. 542 und 543) zusammengestellt; die Bezeichnungen der Meridiane sind auf die Netzhaut zu beziehen. Die Grössen der Quadrate entsprechen, da der Radius des Halbkreises = 200 Mm. ist, Gesichtswinkeln von je 17′ 10″ für 1 Mm. Seite.

*) Mit Rücksicht auf die Angaben III. 1, p. 54 dieses Handbuches bemerke ich, dass der erste Perimeter von mir angegeben und 1857 in Archiv f. Ophthalm. III. 2, p. 40, später Poggendorff's Annalen 1861, Bd. 115 und Physiologie der Netzhaut 1864, p. 116 abgebildet worden ist. Erst im Jahre 1869 ist von Möser der von Förster modificirte und Perimeter genannte Apparat in seiner Dissertation beschrieben worden, ohne dass Möser trotz des stellenweise historischen Tenors seiner Dissertation meiner erwähnt.

Die Zahlen dieser Tabellen differiren allerdings in manchen Punkten von denen, welche LANDOLT und SCHIRMER gefunden haben, indess ist im Ganzen eine genügende Uebereinstimmung, wenn man berücksichtigt, dass LANDOLT's farbige Objecte eine Grösse von 3° 20′, SCHIRMER's Objecte eine Grösse von 5° 4′, die meinigen Grössen von 17′ 10″ — 34′ 20″ — 1° 9′ — 2° 17′ — 4° 34′ — 9° 8′ hatten. LANDOLT's Zahlen (III. 1, p. 69 dieses Handbuchs und Ann. d'Ottalm. Tav. VII[a], Schema I) stimmen übrigens auch nur theilweise mit SCHIRMER's (l. c. p. 198) Zahlen. Auch SCHÖN's Zahlen (Klinische Monatsblätter 1873, p. 175) und TREITEL's Zahlen (Periphere und centrale Farbenperception etc. Inaug.-Diss. Königsberg 1875) weichen nicht erheblich ab. Im Ganzen hat LANDOLT höhere Zahlen erhalten als SCHIRMER und ich, was sehr wohl von der Verschiedenheit der Pigmente, der Beleuchtung, aber auch von individuellen Verhältnissen, namentlich einer andern Beurtheilung der Farblosigkeit herrühren kann.

Durch meine Versuche wurde festgestellt

1) der grosse Einfluss, welchen die Umgebung der Pigmente auf die Farbenempfindung auch beim indirecten Sehen hat, wie ein Vergleich von Tabelle XX[a] mit Tabelle XX[b] lehrt,

2) der Umstand, dass die Grösse des farbigen Objectes massgebend ist für die Entfernung vom Centrum, in welcher es noch farbig empfunden wird (siehe Figur 67 S. 544). — Die gegentheilige Behauptung WOINOW's (l. c. p. 219), dass die Grenze für die Farbenempfindung immer dieselbe ist, wenn die Gesichtswinkel nicht von der Mitte, sondern von dem dem Auge zugekehrten Rande der Pigmentfläche an gerechnet werden, muss ich nach vielfacher, wiederholter Untersuchung für falsch erklären. Auch RAEHLMANN, SCHÖN (Klinische Monatsblätter 1873, p. 171) und SCHIRMER (l. c. p. 202) sprechen sich entschieden gegen WOINOW's unbegründete Behauptung aus. KRÜKOW (Archiv für Ophthalm. 1874, XX. 1, p. 255) giebt Versuche an, wonach es keinen Unterschied macht, ob Quadrate von 3 Mm.², 6 Mm.² oder 12 Mm.² angewendet werden, seine Zahlen sind bis auf Winkelminuten dieselben. Eine solche Genauigkeit der Bestimmung ist mir vollkommen unbegreiflich. — KRÜKOW hat aber doch WOINOW's Behauptung insoweit modificirt, dass die Farbenempfindung »nur innerhalb gewisser Grenzen« (p. 288) unabhängig sei von der Grösse (und dem Hintergrunde) des Objectes. —

3) dass Pigmente verschiedener Farbentöne unter sonst gleichen Umständen verschiedene Grenzzonen für die Erkennbarkeit der Farbe zeigen; dieser Satz ist von allen späteren Beobachtern bestätigt, aber durch die Untersuchungen von SCHELSKE, LANDOLT, SCHIRMER erweitert und modificirt worden in Bezug auf die Folge verschiedener Farbentöne. Uebereinstimmend mit mir finden diese Forscher, dass Blau auf schwarzem Grunde am weitesten peripherisch erkannt wird, die übrigen Farben stimmen aber nicht:

AUBERT: Blau, Roth, Gelb, Grün.
SCHIRMER: Blau, Gelb, Violett, Purpur, Orange, Roth, Gelbgrün, Blaugrün.
LANDOLT: Blau, Gelb, Orange, Roth, Hellgrün, Dunkelgrün, Violett.

Auch SCHIRMER und LANDOLT differiren also erheblich von einander, namentlich in Bezug auf Violett. — SCHELSKE hat, indem er mit Mischungen von Farben experimentirte, gefunden, dass das Blau der Mischung noch auf Zonen der Netzhaut erkannt wurde, wo das Roth nicht mehr empfunden wurde, und dasselbe

Tabelle XX^a.

Farbige Quadrate auf weissem Grunde.

Seite des Quadrats =	1 Mm.		2 Mm.		4 Mm.		8 Mm.		16 Mm.		32 Mm.	
Augen:	L.	R.	L.	R.	L.	R.	L.	R.	L.	R.	L.	R.
Roth.												
Innen.	25°	25°	25°	25°	32°	33°	48°	50°	55°	60°	76°	70
I. U.	15	18	16	18	28	25	38	35	48	40		
U.	14	14	16	18	26	22	36	33	39	39		
U. A.	14	14	16	17	24	24	36	29	40	35		
A.	15	15	19	19	26	26	32	39	36	36	42	43
A. O.	16	14	18	19	22	24	32	36	32	40	40	51
O.	12	15	16	18	22	24	33	35	44	49	50	45
O. I.	17	16	20	19	29	32	45	46	50	56	68	60
Mittel:	16	$16\frac{3}{8}$	$18\frac{2}{8}$	$19\frac{1}{8}$	$26\frac{1}{8}$	26	$37\frac{4}{8}$	$36\frac{5}{8}$	43	$44\frac{3}{8}$	(55)	(54
Gelb.												
I.	28°	30°	38°	36°	58°	58°	80°					
I. U.	20	20	34	34	50	45						
U.	18	19	25	20	35	37						
U. A.	20	18	25	25	40	40						
A.	22	20	32	30	50	38	55	50				
A. O.	21	20	30	32	36	42	45	(40)				
O.	18	20	32	32	40	40	48	45				
O. I.	22	24	34	34	45	46	70	60				
Mittel:	$21\frac{1}{8}$	$20\frac{1}{8}$	$31\frac{2}{8}$	$30\frac{3}{8}$	$44\frac{2}{8}$	$43\frac{4}{8}$						
Grün.												
I.	26°	26°	40°	48°	65°	62°	73°	75°				
I. U.	20	19	35	36	50	50	60	56				
U.	20	17	35	32	35	36	47	45				
U. A.	20	20	32	34	40	44	47	41				
A.	20	19	37	36	(50)	36	50	50				
A. O.	18	24	35	34	35	32	38	42				
O.	17	20	35	32	40	45	40	(40)				
O. I.	20	20	36	42	44	45	48	50				
Mittel:	$20\frac{1}{8}$	$20\frac{5}{8}$	$35\frac{5}{8}$	$36\frac{6}{8}$	$44\frac{7}{8}$	$43\frac{6}{8}$	$50\frac{3}{8}$	$49\frac{7}{8}$				
Blau.												
I.	15°	15°	26°	26°	52°	50°	64°	66°	74°	75°	78°	77°
I. U.	11	11	22	23	35	30	52	49	54	58	66	58
U.	11	11	19	18	36	30	42	40	54	48		
U. A.	13	14	23	19	30	35	49	44	54	48		
A.	14	14	26	24	36	34	50	50	60	52		
A. O.	12	10	24	23	30	34	43	39	52	52		
O.	12	11	21	21	35	33	40	48	50	58	55	65
O. I.	17	15	25	20	41	46	55	58	60	67	73	73
Mittel:	$13\frac{1}{8}$	$12\frac{5}{8}$	$23\frac{2}{8}$	$21\frac{6}{8}$	$36\frac{7}{8}$	$36\frac{7}{8}$	$49\frac{3}{8}$	$49\frac{2}{8}$	$57\frac{2}{8}$	$57\frac{2}{8}$	(68)	(68)

Tabelle XX b.

Farbige Quadrate auf schwarzem Grunde.

Seite des Quadrats =	1 Mm.		2 Mm.		4 Mm.		8 Mm.		16 Mm.		32 Mm.	
Augen:	L.	R.	L.	R.	L.	R.	L.	R.	L.	R.	L.	R.
Roth.												
Innen.	34°	40°	39°	44°	59°	59°	74°	75°	85°	85°		
I. U.	32	32	31	29	48	39	60	59	67	61		
U.	24	23	28	22	32	30	43	37	45	46		
U. A.	28	25	30	30	31	38	43	42	45	50		
A.	30	30	35	30	36	39	45	45	54	50		
A. O.	30	28	34	30	37	40	42	46	48	46		
O.	29	29	31	27	38	46	42	52	45	50		
O. I.	30	29	38	38	50	53	67	72	80	75		
Mittel:	$29\,^5/_8$	$29\,^4/_8$	$33\,^2/_8$	$31\,^2/_8$	$41\,^3/_8$	43	52	$53\,^4/_8$	$58\,^5/_8$	$57\,^7/_8$		
Gelb.												
I.	36°	(45)°	40°	42°	52°	50°	61°	66°	75°	80°	85°	90°
I. U.	25	32	28	32	38	44	49	44	55	62	80	75
U.	24	28	28	26	29	36	43	49	50	49	52	50
U. A.	28	25	30	28	36	36	36	40	47	45	50	50
A.	30	30	34	35	38	37	38	40	50	42	56	52
A. O.	28	28	30	30	35	35	45	45	50	50	55	(48)
O.	26	30	28	26	35	43	42	49	46	55	52	55
O. I.	30	35	36	38	46	49	59	(48)	70	61	85	90
Mittel:	$28\,^3/_8$	$31\,^5/_8$	$31\,^6/_8$	$32\,^1/_8$	$38\,^5/_8$	$41\,^2/_8$	$46\,^5/_8$	$47\,^5/_8$	$55\,^3/_8$	$55\,^4/_8$	$64\,^3/_8$	$(63\,^6/_8)$
Grün.												
I.	30°	34°	38°	36°	50°	45°	72°	66°	85°	80°	90°	
I. U.	25	22	23	25	30	33	50	(37)	64	61	70	
U.	24	20	24	22	28	28	38	35	55	50		
U. A.	24	24	26	23	31	31	40	38	58	50		
A.	28	25	28	(24)	36	35	46	36	58	54	60	
A. O.	22	20	27	24	28	28	40	36	57	48		
O.	20	20	29	27	35	40	44	46	50	50	60	64
O. I.	25	25	36	33	44	46	52	53	72	68	90	80
Mittel:	$24\,^6/_8$	$23\,^6/_8$	$28\,^7/_8$	$(26\,^6/_8)$	$35\,^2/_8$	$35\,^6/_8$	$47\,^6/_8$	$(43\,^3/_8)$	$62\,^3/_8$	$57\,^5/_8$		
Blau.												
I.	30°	30°	38°	64°	70°	68°	85°					
I. U.	32	36	45	51	54	52	55	62				
U.	26	30	40	44	49	45		52				
U. A.	32	35	45	47	48	50	55	55				
A.	40	40	45	48	50	54	60	60				
A. O.	30	35	45	40	(45)	48	52	52				
O.	31	34	48	48	49	56	59	60				
O. I.	43	44	56	56	68	65	74	70				
Mittel:	$35\,^4/_8$	38	$47\,^6/_8$	$49\,^6/_8$	$54\,^1/_8$	$54\,^1/_8$	$62\,^6/_7$	$58\,^6/_7$				

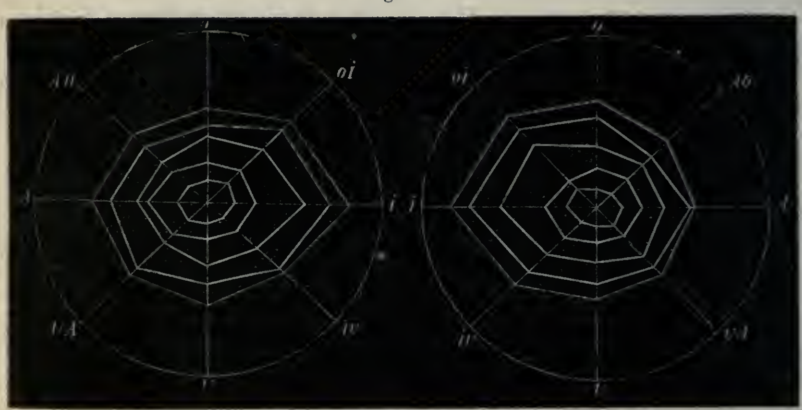
haben Helmholtz (Physiol. Optik p. 301) für Rosa, Schirmer für Violett und Purpur gefunden. Indess findet Schirmer für Blaugrün, dass ihm noch die Empfindung des Gelb bleibt in Zonen, wo von Grün nichts mehr wahrgenommen werden kann. Raehlmann (Archiv für Ophthalm. 1874, XX. 1, p. 17, Figur 2), welcher gleichfalls Spectralfarben beobachtete, findet für die Grenzzonen von der Peripherie nach dem Centrum die Farbenfolge:

Blau, Gelb, Violett, Grün, Roth

und erklärt die Verschiedenheit der Grenzzonen für die verschiedenen Principalfarben aus den Helligkeitsverhältnissen derselben. (Schelske, der mit spectralem Violett experimentirte, hat durch seine Beobachtungen einen Beitrag für die oben § 37 angegebene Auffassung Hering's geliefert, dass im Violett zugleich Roth und Blau empfunden werden.)

4) Nach Purkinje's beiläufigen Bemerkungen habe ich festgestellt, womit sämmtliche spätern Beobachter übereinstimmen, dass in den verschiedenen Meridianen der Netzhaut die Grenzzonen für die Farben sehr verschieden weit von dem Fixationspunkte liegen, wie die beistehende für Blau auf weissem Grunde

Fig. 67.



nach Tabelle XX[a] entworfene Zeichnung Figur 67 zeigt, welche für die Quadrate von 1 Mm., 2 Mm., 4 Mm., 8 Mm., 16 Mm. die Zonen darstellt, in welchen die Farbenempfindung aufhörte.

5) Schon Purkinje hat verschiedene Uebergänge durch Farbentöne und Farbennüancen beobachtet, ehe Farblosigkeit eintritt, und zwar geht nach

Purkinje: Zinnober durch Orange und Blassfahlgelb,
Purpur durch Violett und Blau,
Violett durch verschiedene Töne bis Blau,
Grün durch Gelbgrün und Gelb.

Auf schwarzem Grunde nach

Aubert: Roth durch Rothgelb und Gelbgrau zu Grau,
Blau durch immer weisslichere Nüancen zu Grau,
Grün durch Graugelb zu Grau,
Gelb durch Graugelb zu Grau.

Schelske: Spectrales Gelb durch Lauchgrün,
Grün durch Grauweiss mit einem Stich ins Bläuliche,
Blau durch grünlich zu weiss,
Violett durch Dunkelblau.

Woinow auf weissem Grunde:
Roth durch gelblich, gelbliches Blau zu Schwarz,
Orange durch gelblich, gelblich-grau,
Gelb wird mehr weisslich,
Grün wird gelblich, schmutzig gelblich,
Blau wird heller,
Violett in Blau, zuerst gesättigt, dann heller,
Purpur in schwaches Violett, gesättigt Blau, helles Blau.

Aehnlich sind die Veränderungen, welche Schirmer angiebt, ausserdem geht bei ihm Blaugrün durch Gelb. — Raehlmann (Archiv f. Ophthalm. XX. 1, p. 17) findet an Spectralfarben im dunklen Zimmer folgende Uebergänge:

Roth durch Orange, Schwefelgelb zu Weiss,
Violett durch Blau in Blauweiss,
Grün durch Goldgelb, Hellgelb in Weiss,
Gelb und Blau werden nur heller.

6) Donders und Landolt (Klinische Monatsblätter 1873, p. 356 und III. 1, p. 70 dieses Handbuchs) haben nachgewiesen, dass die Farbenempfindung auf den peripherischen Netzhautzonen eine dem Centrum gleiche bleibt, wenn die Intensität der Beleuchtung gesteigert wird: also auch beim indirecten Sehen sind Gesichtswinkel und Helligkeit massgebend für die Farbenperception. Nagel (Jahresbericht für Ophthalmologie 1872, III. p. 118) bestätigt Landolt's Angabe. *)

7) Endlich habe ich noch zu bemerken, dass die peripherischen Theile der Netzhaut für die Farbenempfindung viel schneller ermüden, als die centralen, man also nur sehr kurze Zeit die farbigen Objecte farbig sieht oder sie wieder farbig sieht, nachdem sie schon farblos geworden waren, wenn man die Objecte oder das Auge ein klein wenig bewegt, so dass die Bilder auf unermüdete Netzhautstellen fallen. — Auch hierin liegt wohl ein Grund für die numerischen Differenzen verschiedener Beobachter.

Auf Grund aller dieser Ergebnisse glaube ich den früher ausgesprochenen Satz, dass in der Farbenempfindung nur ein gradueller Unterschied zwischen den centralen und peripherischen Netzhautregionen stattfindet, aufrecht erhalten zu müssen. Schelske glaubte aus der Veränderung, welche die Farbenempfindung bei ein und demselben Objecte und bei gleichbleibender Helligkeit erleidet, wenn sie auf mehr peripherischen Netzhautstellen stattfindet, schliessen zu können, dass die mehr peripherischen Zonen »rothblind« seien. Er stützt sich dabei theils auf die Veränderung, welche

*) Herr Dr. Landolt theilt mir darüber noch mit: »Hatten die Spectralfarben nicht das Maximum der Intensität, so wurden sie nur als Licht, und erst dem Centrum näher als Farben erkannt, und zwar in der Reihenfolge Blau — Roth — Grün — Violett. Gelb wird als gelber Schein schon sehr früh, beinahe gleich beim Erscheinen als solches angegeben. — Die Versuche wurden vorgenommen im möglichst verdunkelten Zimmer, nach über 20 Minuten dauernder Adaptation. Zwischen den Einstellungen der Farben wurden die Augen verbunden.

Violett und Rosa erleiden, theils auf das Erscheinen gemischter Farben, von dene das in die Mischung eintretende Roth nicht empfunden wurde. Die äusserste Zonen sind aber nicht blos rothblind, sondern auch grünblind und gelbblind, wi aus den Tabellen und z. B. auch aus Landolt's Zeichnung Schema I, Tav. VII der Annali d'Ottalmologia 1871 hervorgeht. Die grossen Divergenzen der ein zelnen Beobachter lassen einen Befund, wie ihn Schelske gehabt hat, kaum al allgemein gültig erscheinen. Wir haben aber gesehen in § 40 und § 41, das ganz ähnliche Veränderungen beim directen Sehen in der Farbenempfindung auf treten, wenn die Beleuchtung und der Gesichtswinkel vermindert werden. Reic (Klinische Monatsblätter 1874, p. 247) hat nun noch gefunden, dass mit Steige rung des intraocularen Druckes gleichfalls die Farbenempfindung für das direct Sehen pervertirt und endlich ganz ausgelöscht wird, und zwar auch durch all mälige Uebergänge; nach Reich geht die Empfindung des

Roth durch orange, gelb, grauweiss,
Grün durch grünlich gelb, gelb, grauweiss,
Blau durch schwach violett, grauweiss

in Finsterniss über. Reich schliesst daraus, dass mit Steigerung des intraocularen Druckes *die centralen Theile den peripheren Theilen der Netzhau analog werden.*

Ich habe die Ergebnisse dieses Capitels etwas eingehender behandelt, wei diese Art der Untersuchung des Farbensinnes eine praktische und prognostisch Wichtigkeit erlangt hat und der Augenarzt von vornherein bei der Untersuchun darauf gefasst sein muss, mancherlei Divergenzen, deren Ursache bisher nich aufgeklärt ist, welche aber noch in der Breite der Gesundheit liegen, bei Patiente zu finden.

§ 43. *Farbencontrast und Farbeninduction.* — In ähnlicher Weise wie die Empfindung von Weiss, Grau und Schwarz beeinflusst wird, wenn gleich zeitig eine differente Helligkeitsempfindung auf einer andern Stelle der Netzhau stattfindet (§ 28), sehen wir auch, dass die Farbenempfindung verändert wird wenn eine Stelle oder ein grösserer Theil der Netzhaut durch eine Farbenempfin dung afficirt wird — ja man kann, wie Hering sagt, die durch Schwarz und Weis erzeugten Empfindungen häufig direct ins Farbige übersetzen. Wer nicht geüb ist, kleine Helligkeitsdifferenzen zu unterscheiden, dem wird es meistens leichte werden, die Erscheinungen des Contrastes an Farben zu bemerken.

Als *Contrastfarbe* können wir allgemein die *complementäre* ode *Ergänzungsfarbe* (antagonistische Farbenempfindung [Hering]) bezeichnen Denn Brücke hat in einer höchst genauen und umsichtigen Arbeit, auf die wi indess hier nicht näher eingehen können (Wiener Akad.-Berichte 1865, Bd. 51 Ueber Ergänzungs- und Contrastfarben), nachgewiesen, dass »wahrscheinlich di bis jetzt bemerkten Unterschiede zwischen Contrast- und Ergänzungsfarben, s weit sie nicht auf blossen Beobachtungsfehlern beruhen, sich darauf zurückführe lassen, dass die verglichenen Farben verschiedenen Gliedern einer und derselbe Reihe entsprechen,« d. h. dass die verglichenen Farben verschiedenen Farben nüancen entsprechen. Anderseits findet Brücke, dass jede Farbe nicht *eine* Er gänzungsfarbe, sondern eine Reihe von Ergänzungsfarben hat, welche sich vo einander durch ihren Gehalt an Weiss unterscheiden, und dass man sich dies

eihe durch successives Hinzufügen von Weiss aus derjenigen monochromatischen 'arbe entstanden denken kann, welche das einfachste Complement der Grund-rbe bildet.

Ungefähr werden wir also die Contrastfarbe finden, wenn wir in dem New-n'schen Farbencirkel (s. Figur 64 in § 35) von einem Farbentone aus eine gerade inie durch Weiss (im Mittelpunkte) bis zur entgegengesetzten Stelle des Kreises iehen — die Contrastfarbe liegt also auf der Peripherie des Kreises um 180° von er primären Farbe entfernt.

Die Hauptmethoden zur Erzeugung von Contrastfarben sind etwa folgende:) die Erzeugung farbiger Schatten; sie entstehen, wenn eine farbige nd eine farblose Lichtquelle auf eine farblose Fläche Schatten werfen. Die chatten, welche von Tageslicht und Kerzenlicht auf weisses Papier von einem tabe, etwa einem Bleistift, geworfen werden, sind blau und gelbroth; die gelb-othe Farbe des Schattens rührt davon her, dass der von dem weissen Tageslichte eworfene Schatten von dem gelbrothen Kerzenlichte beleuchtet wird — das lau des von dem Kerzenlichte geworfenen Schattens dagegen ist subjective ontrastfarbe.

Um für die verschiedenen Farben die Contrastfärbungen des Schattens nachzuweisen, endet man zweckmässig zwei Oeffnungen in dem Laden eines finstern Zimmers, wie in gur 68, an, vor deren eine man ein farbiges Glas schiebt: immer erscheint dann der von eser letzteren Farbe geworfene Schatten in der complementären Farbe des Glases, obgleich

Fig. 68.



nur von weissem Lichte beleuchtet wird — ja er erscheint sogar auch dann noch comple-ntär gefärbt, wenn die farblose Lichtquelle mit einem gleichfarbigen Glase, welches aber ehr weisses Licht durchlässt, als das andere, bedeckt wird.

Die farbigen Schatten scheint zuerst Leonardo da Vinci vor 1519 (Mahlerey 1786, p. 67) d demnächst Otto von Guericke (Experimenta nova Magdeburgica 1672, p. 142) erwähnt zu ben. Ihre Bedeutung als subjective Contrasterscheinung wurde aber hauptsächlich von chner (Poggendorff's Annalen 1838, Bd. 44, p. 221 und Berichte der Leipziger Gesellschaft r Wissenschaften 1860, p. 146) nachgewiesen und namentlich gegen Osann (Poggendorff's nalen 1833, Bd. 27, p. 694 und Würzburger Wissenschaftliche Zeitschrift 1860, Bd. I, p. 61), elcher die objective Natur der farbigen Schatten behauptete, aufrecht erhalten.

2) Wird ein weisses, graues oder schwarzes Papierstückchen auf eine grosse

farbige Fläche gelegt, so erscheint das Papierstückchen sofort mit der complementären Farbe tingirt; ebenso, wenn man ein farbiges Glas mit dünnem Papier bedeckt, vor eine Lampe hält und eine Stelle des Papiers und Glases mit einem Papierschnitzel bedeckt (J. Müller, Handbuch der Physiologie 1837, Bd. II, p. 372). Entsprechende Veränderungen erleiden farbige Papierstückchen in ihrem Farbentone. (Rollett, Wiener Akademie-Berichte 1867, Bd. 55, Februarheft.)

Diese Contrasterscheinungen sind, nachdem schon Leonardo da Vinci (l. c. p. 121) darau aufmerksam geworden war, von Prieur de la Côte d'Or (Annales de Chimie T. 54, année 13 de Revolution, also 1805, p. 1) behandelt worden. Chevreul, von dem die Benennung *contraste simultané*, im Gegensatz zu *contraste succedane* (complementäres Nachbild) herrührt, hat si seit 1828 (Mémoires de l'Institut 1832, T. XI, p. 447 und Farbenharmonie, Stuttgart 1840) genauer verfolgt und namentlich gefunden, dass die Contrastwirkung sich nicht blos in unmittelbarer Nähe der farbigen Objecte geltend macht, sondern weithin erstreckt.

Dass es sich hier nicht etwa um complementäre Nachbilder handelt, geht am evidentester daraus hervor, 1) dass die Contrastfärbung auch bei der momentanen Beleuchtung mittelst de elektrischen Funkens auftritt. (Aubert in Moleschott's Untersuchungen 1858, Bd. V, p. 290 un Physiologie der Netzhaut p. 383.) Rollett sah gleichfalls die Contrastfarben an einer tachistoscopischen Vorrichtung (Wiener Akademie-Berichte 1867, Bd. 55, Maiheft). Auch im Nachbilde bei geschlossenen Augen tritt die Contrastfärbung sehr deutlich auf; — 2) dass die Contrastfarbe besonders deutlich auftritt, wenn die erregende Farbe sehr wenig lebhaft, sehr stark mit Grau gemischt ist: bei den Versuchen mit den Maxwell'schen Scheiben ist es mir seh auffallend gewesen, dass wenn die Farbengleichung noch nicht ganz stimmte, also z. B. in dem äusseren aus Pigmenten gebildeten Kranze noch ein wenig zu viel Blau war, dann der innere aus einem Weiss und Schwarz gebildete Kranz sehr stark gelb tingirt, sogar deutlicher gelb als der äussere blau erschien. — Ganz analog sind die Versuche von Hermann Meyer in Leipzig (Poggendorff's Annalen 1855, Bd. 95, p. 170): legt man auf ein farbiges Papier ein weisses oder noch besser graues Stückchen Papier und deckt ein durchscheinendes Papier oder eine mattgeschliffene weisse Glasplatte darüber, so erscheint das Grau in der Contrastfarbe. Dasselbe ist der Fall, wenn man ein farbiges Papierstückchen auf ein graues Papier legt und eine matte Glastafel darüber deckt. — Man darf indess, wie Rollett hervorhebt, daraus nich schliessen, dass weissliche Farben sich besser zur Erzeugung von Contrasterscheinunger eignen, als gesättigte Farben. Mittelst eines Apparates (l. c. p. 2), welcher der Hauptsache nach aus farbigen Glasplatten, in welche ein rundes Loch von 27 Mm. Durchmesser eingeschliffen ist und in welches weisse oder graue Gläser (Smoke- oder Rauchgläser) eingesetz werden, deren Mittelpunkt man scharf fixirt, hat Rollett gefunden, dass gesättigte Farben eine lebhafte Contrastempfindung hervorrufen, dass aber allerdings eine Reihe von mittlerer Helligkeiten des Contrastfeldes dem chromatischen Effect des Contrastes am günstigsten ist, und dass, wenn der farblose Reiz ein bestimmtes Maximum der Helligkeit überschritten hat, die Deutlichkeit der Contrastfarbe wieder abnimmt.

3) Ferner lassen sich die Contrasterscheinungen beobachten an den sogenannten Spiegelversuchen, welche zuerst von Osann (Poggendorff's Annalen 1833, Bd. 27, p. 694) angegeben, von Dove (ibid. 1838, Bd. 45, p. 158) modificirt und endlich von Ragona Scina (Raccolta fisico-chemica del Zantedeschi 1847, II. p. 207, s. Brücke in Poggendorff's Ann. 1851, Bd. 84, p. 410) in eine sehr bequeme Form gebracht worden sind.

Man stellt ein weisses Papierblatt mit einem schwarzen Flecke senkrecht auf, legt an dessen unteren Rand ein eben solches Blatt mit einem schwarzen Flecke wagerecht, hält in den rechten Winkel der beiden Papierblätter ein farbiges Glas um etwa 45° geneigt und blickt durch das gefärbte Glas auf das wagerecht liegende Papierblatt: das senkrechte Blatt spiegelt sich an der Oberfläche des farbigen Glases und dieses nahezu farblose Spiegelbild wird so auf

das wagerechte Blatt projicirt, dass die Bilder der schwarzen Flecke neben einander liegen. In das Auge des Beobachters gelangt also theils reflectirtes farbloses Licht, theils durchgelassenes farbiges Licht, und zwar enthält das Bild des Fleckes an dem senkrechten Blatte nur das von dem weissen wagerechten Papier durch das farbige Glas gehende farbige Licht, das Bild des schwarzen Fleckes auf dem wagerechten Papier nur das gespiegelte farblose Licht des senkrechten Papierblattes: dieser erscheint aber nicht farblos, sondern complementär gefärbt. Ist das Glas roth, so erscheint der gespiegelte Fleck auch roth, der durch das Glas gesehene Fleck aber blaugrün: das Blaugrün ist subjective Contrastempfindung.

4) Hierher gehört endlich ein Versuch zur Erzeugung einer binocularen Contrastempfindung, der seitliche Fensterversuch von Fechner (Abhandlungen der Leipziger Gesellschaft der Wissenschaften 1860, Bd. VIII, p. 511) benannt.

Smith zu Fochabers (Brewster in Poggendorff's Annalen 1833, Bd. 27, p. 493) hat folgenden Versuch angegeben, welchen Brücke (ebenda 1851, Bd. 84, p. 418) als zu den Contrasterscheinungen gehörig aufgefasst und erklärt hat: Lässt man von der Seite her Tageslicht oder Lampenlicht auf das Auge, aber nicht durch die Cornea scheinen und betrachtet ein weisses Quadrat auf schwarzem Papier so, dass man dasselbe in Doppelbildern erblickt, so erscheint das mit dem beleuchteten Auge gesehene Bild blaugrün, das mit dem durch die Nase beschatteten Auge gesehene dagegen roth. Für schwarze Objecte auf hellem Grunde erscheinen die Färbungen umgekehrt. Nach Brücke's Erklärung rührt die Farbe des mit dem beleuchteten Auge gesehenen Objectes von dem durch die Sclerotica hindurchdringenden Lichte her, welches im Auge zerstreut wird und roth ist; da dieses Licht aber dauernd im Auge verbreitet ist, so macht es nach Brücke die Netzhaut relativ unempfindlich gegen das Roth des durch die Pupille einfallenden weissen Lichtes, welches daher den Eindruck von Grün macht; fällt dagegen von einem schwarzen Object nur wenig Licht durch die Pupille auf die Netzhaut, so erscheint das ursprüngliche rothe Licht. Im Gegensatz zu diesem Grün erscheint das Weiss in dem unbestrahlten Auge roth, und umgekehrt das Schwarz in dem unbestrahlten Auge grün. Je länger ich das Licht in der beschriebenen Weise mein Auge bestrahlen lasse, um so intensiver tritt die Färbung der Objecte hervor: ich habe das Grün von der Intensität eines Chrysopras gesehen, nur ein wenig bläulicher. — Für Brücke's Erklärung spricht auch folgende, von mir gemachte Beobachtung: halte ich ein sehr dunkles blaues Glas vor das eine Auge, während das andere frei ist, so erscheint ein weisses Object vollständig weiss: schliesse ich nun das mit dem blauen Glase bewaffnete Auge, so erscheint sofort dem freien Auge das Object gelblich; das Glas muss aber so dunkel sein, dass von Wettstreitsphänomenen nichts bemerkt wird.

Die der Contrastempfindung verwandte Farbeninduction, von Brücke entdeckt und so benannt, besteht darin, dass wenn ein Theil des Gesichtsfeldes eine Farbenempfindung, der andere eine farblose Empfindung hat, dieser letztere Theil sich mit der gleichen Farbe, welche das farbige Gesichtsfeld hat, überzieht. Letztere ist die inducirte, erstere die inducirende Farbe von Brücke genannt worden.

Brücke (Poggendorff's Annalen 1851, Bd. 84, p. 424) fand, dass eine schwarze Scheibe, welche vor einem grösseren Ausschnitt im Fensterladen eines fast ganz finstern Zimmers, der mit einem grünen oder violetten Glase bedeckt war, gehalten wurde, mit Grün oder Violett überzogen erschien. Roth erzeugte bei Brücke nur Contrastempfindung unter gleichen Umständen, Blau und Gelb gaben unsichere Resultate. Helmholtz (Physiologische Optik p. 396) und ich (Physiologie der Netzhaut p. 386) haben dagegen bei allen Farben der Gläser die Farbeninduction nach kurzem Fixiren auftreten sehen. Bei mir erscheint die Scheibe im

ersten Momente farblos, überzieht sich bald mit der Farbe des Glases, dies Färbung wird namentlich in der Mitte der Scheibe immer intensiver, so dass di Scheibe fast durchscheinend aussieht. Dieser Verlauf der Inductionsempfindun schliesst die Annahme aus, dass die Induction etwa auf einer Zerstreuung de farbigen Lichtes im Auge beruhte; ebensowenig sind dabei Nachbilder im Spiele bei unruhiger Haltung des Auges erscheint der verschobene Theil der Scheibe i complementärer Farbe. — Ich habe ausserdem Inductionserscheinungen in seh auffallender Weise bemerkt, wenn ich im indirecten Sehen ein blaues Quadra auf schwarzem Grunde beobachtete: der Grund überzog sich hin und wieder au kurze Zeit mit dem gleichfarbigen Blau des Quadrates.

Bei der offenbaren Verwandtschaft der Inductionsempfindungen mit de Contrastempfindungen scheinen mir die Inductionsempfindungen gegen die Er klärung des Contrastes als einer Urtheilstäuschung zu sprechen, und als ein Stütze für die Ansicht Hering's zu dienen, dass wir es hier mit rein physiologische Empfindungsvorgängen zu thun haben. Mir ist wenigstens kein Grund erfind lich, warum wir ein schwarz empfundenes Object das eine Mal als rothgelb, da andere Mal als blau beurtheilen sollten (cf. § 28). Alle diese Erfahrungen be stätigen vielmehr Fechner's Ausspruch (Poggendorff's Annalen Bd. 50, p. 443) »Der Eindruck, den eine Stelle der Retina empfängt, reagirt auf die andere Stellen der Netzhaut mit, und zwar wird, wenn auch nur ein sehr begrenzte Theil der Netzhaut getroffen wird, der ganze übrige Theil der Netzhaut in Mit leidenschaft gezogen.«

§ 44. **Binoculare Farbenempfindung. Wettstreit der Gesichts felder. Glanz.** — Wir haben schon im vorigen Paragraph unter 4) den seit lichen Fensterversuch als binocularen Contrastversuch erwähnt: wenn man i diesem Versuche zugleich mit beiden Augen auf ein helles Object sieht, so be merkt man nichts von einer Färbung, wenn auch das eine Auge für sich da Object röthlich, das andere grünlich sieht. Eine grosse Anzahl von Physiologen zu denen auch ich gehöre, finden dem entsprechend, dass wenn vor das ein Auge ein nicht sehr intensiv gefärbtes und nicht sehr dunkles Glas gehalten wird während das andere frei ist, ein Object, z. B. ein weisses Quadrat auf schwarzen Grunde gleichmässig farbig tingirt erscheint. Ich habe gefunden, dass sich wenigstens für mein Auge, eine ziemlich bestimmte Grenze finden lässt, wo ein Combination der Empfindungen beider Augen eintritt und zwar 1) abhängig vo der Helligkeit des beobachteten Objectes, 2) von der Durchlässigkeit der Gläse für Licht, 3) von der Farbe der Gläser.

Wenn ich einen Bogen weisses Papier im Zimmer in der Entfernung vo etwa 2 Meter betrachte, indem ich vor das eine Auge ein farbiges Glas halte, s findet noch eine gleichmässige Färbung des gemeinschaftlichen Gesichtsfelde statt, wenn die Gläser mehr als 0,2 Licht durchlassen — betrachte ich hellbe leuchtete, weisse Wolken am blauen Himmel, so tritt noch eine gleichmässig Färbung ein, wenn die Gläser mehr als 0,1 Licht durchlassen. Bei dem weisse Papier treten aber ungleichmässige und wechselnde Färbungen (Wettstreit de Gesichtsfelder) auf, wenn die Gläser weniger Licht durchlassen.

Die Menge des Lichtes, welches farbige Gläser durchlassen, ist ebenso wi bei dem paradoxen Versuche Fechner's (cf. § 29) massgebend für die Combina

ionsfähigkeit der binocularen Empfindungen. Dies findet auch PANUM (Physio-
ogische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel 1858, p. 49).
Bei mir bringt ein rothes Glas, welches von 1000 Theilen 180 Theile Licht durch-
lässt, ein gelbes Glas, welches 550, ein grünes, welches 200, ein blaues, welches
220, ein violettes, welches 400 Theile Licht durchlässt, wenn ich es vor das eine
Auge halte, während das andere frei ist, immer eine Gesammtfärbung des ge-
meinschaftlichen Gesichtsfeldes hervor, mag ich auf einen gut beleuchteten Bogen
weisses Papier oder auf eine weisse Wolke sehen. Ich bemerke dazu, dass man
das Object nicht gar zu gross wählen darf, nämlich kleiner, als der Raum des
gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes ist (s. § 56). Dieses Moment für die Combina-
tion der binoculären Farbenverschmelzung hat schon ALEXANDER PREVOST (Essai
sur la théorie de la vision binoculaire Génève 1843, p. 35) hervorgehoben. Das
Nähere siehe bei AUBERT, Physiologie der Netzhaut p. 293—298.

Man kann annähernd die Durchlässigkeit verschiedener farbiger Gläser für Licht nach
DOVE's Methode (Poggendorff's Annalen 1861, Bd. 114, 149) bestimmen: man legt eine kleine
Photographie auf Glas mit undurchsichtigen Buchstaben und durchsichtigem Grunde auf den
Tisch eines Mikroscops und giebt dem Spiegel eine solche Stellung, dass die Buchstaben
schwarz auf hellem Grunde erscheinen; schiebt man nun über den Spiegel des Mikroscops ein
oder mehrere farbige Gläser, so erscheint der Grund gefärbt in der Farbe des Glases, die
Buchstaben in der Complementärfarbe und zwar entweder dunkler oder heller als der Grund,
da sie ja auch von oben durch diffuses Tageslicht beleuchtet werden. Wenn man nun den
Punkt trifft, wo die Photographie von unten eben so stark beleuchtet wird, als von oben, so ist
von den Buchstaben nichts zu sehen. Diesen Punkt findet man für ein bestimmtes Glas leicht,
wenn man dem Spiegel des Mikroscops verschiedene Stellungen giebt. Man kann nun bei un-
veränderter Stellung des Spiegels graue Gläser, deren Durchgängigkeit für Licht man mit dem
Episkotister (cf. § 29) bestimmt hat, über den Spiegel schieben bis zu gleicher Verdunkelung,
dass die Buchstaben verschwinden und daraus die Absorption der farbigen Gläser für Licht be-
stimmen. Sehr genau ist die Bestimmung allerdings nicht. Eine andere Methode hat HANKEL
angewendet (s. FECHNER, Leipziger Abhandlungen 1860, Bd. VIII, p. 355).

Eine wesentliche Bedingung für eine gleichmässige Empfindung der Farbe im
gemeinschaftlichen Gesichtsfelde ist ferner, dass man fest und sicher fixirt, was
auch DONDERS als wesentlich bezeichnet (Archiv f. Ophthalm. XIII. 1, p. 9 Anm.)
— und ich möchte fast glauben, dass mancher Beobachter verhindert ist, die
Empfindungen der beiden Netzhäute zu verschmelzen wegen zu dunkler Gläser
und unruhiger Haltung der Augen. — DONDERS giebt l. c. ferner an, dass man
Mischfarben um so leichter erhalte, je kleiner die beobachteten Flächen seien, dass
man weiter bei Erleuchtung durch einen einzigen starken Inductionsfunken sofort
die Mischfarbe erhalte, ohne jedweden Wettstreit, dieser dagegen entstehe, wenn
einzelne Funken ziemlich schnell auf einander folgen.

In neuester Zeit hat BEZOLD (Poggendorff's Annalen 1874, Jubelband p. 585)
das Misslingen der Combination in der verschiedenen Brechbarkeit der Farben
und dadurch bedingte verschiedene Accommodationsanstrengung zu finden ge-
glaubt, worin ihm DOBROWOLSKY (Pflüger's Archiv 1875, Bd. X, p. 56) beistimmt.
— HELMHOLTZ dagegen vermuthet (Physiologische Optik p. 777), dass oft der
Schein einer Mischfarbe durch Contrasterscheinungen und Nachbilder hervor-
gerufen werde, ohne dass eine Combination der binocularen Empfindungen
stattfinde.

Allerdings finde ich aber, dass wenn ich mit einem farbigen Glase vor dem

einen Auge und freiem andern Auge eine halbe oder ganze Minute oder mehrer Minuten lang auf eine weisse Wolke oder ein anderes helles Object blicke, ab wechselnd die Färbung des Objectes bald mehr, bald weniger hervortritt, als Wettstreit der Gesichtsfelder eintritt. Schliesse ich das Auge, vor welchem sic das farbige Glas befindet, einige Sekunden, so tritt beim Wiederöffnen desselbe eine sehr starke Färbung des Objectes auf, welche sich um so früher verliert, j dunkler das Glas ist; nach einiger Zeit, namentlich nach einem Lidschlage tri dann wiederum die stärkere Färbung des binoculär gesehenen Objectes hervor.

Einigen Einfluss hat ferner, wie Joh. Müller (Handbuch der Physiologi 1837, II. p. 388) für wahrscheinlich hielt, und Helmholtz (Physiol. Optik p. 775 betont, die Aufmerksamkeit und der Wille, aber der Wechsel tritt oft auch gan unwillkürlich und ohne dass man die Aufmerksamkeit dem einen oder andere Auge zuwendet, ein, und es ist mir meistens ganz unmöglich, bestimmend in de Vorgang einzugreifen. Auch Fechner (Leipziger Abhandlungen 1860, Bd. VIII p. 481 u. f.) hat auf diese zeitlichen Verschiedenheiten bei monocularer Farben reizung aufmerksam gemacht und ebendaselbst auch die »Aufmerksamkeitstheorie ausführlich besprochen.

Bringt man vor beide Augen verschiedenfarbige Gläser, so tritt bei viele Beobachtern, auch bei mir, die Mischfarbe auf, bei vielen Beobachtern aber nicht Der erste, welcher eine Vermischung beider Farben beobachtet hat, scheint Jani (Mémoires et observations sur l'oeil 1779, ich citire nach Prévost's Vision bino culaire 1843, p. 34) gewesen zu sein, später hat namentlich Völckers (Müller' Archiv 1838, p. 60) darüber ausgedehnte Versuche angestellt und gefunden, das bei ruhigem Sehen das Object (der Himmel, eine Lampenglocke, der Mond, ei weisses Papier) in der Mischfarbe erscheint. Ich beschränke mich gegenüber de sehr grossen Zahl von Angaben über binoculäre Farbenmischung auf die Angab dessen, was ich selbst sehe. 1) Die Mischfarbe erscheint mir im Vergleich zu de Farben der Gläser immer sehr unrein und matt; 2) die Mischfarbe tritt nich dauernd ganz gleich auf, bald scheint die eine, bald die andere Farbe zu über wiegen, wenn ich die Gläser über eine halbe Minute vor den Augen habe; 3) di Mischfarbe tritt um so deutlicher auf, je weniger die beiden Gläser an Helligkei und Farbenintensität differiren; 4) helles Blau vor dem einen, Gelb vor dem an deren Auge giebt bei mir grau mit einem Stich ins Grüne — Blau und Roth ode Blau und Violett giebt ein röthliches Grau; Grün und Roth oder Grün und Violet ein Grau mit einem Stich ins Grüne, wenn das grüne, mit einem Stich ins Röth liche, wenn das rothe oder violette Glas heller sind — Blau und Grün gebe ein gelbliches Grau, sehr ähnlich wie Gelb und Grün — Roth oder Violett und Gelb geben ein rothgelbes Grau.

Aehnlich verhalten sich Pigmente, bei denen auch schon Völckers Misch farben erhalten hat, indess tritt hier die eigenthümliche Erscheinung des metalli schen Glanzes als Complication hinzu. Werden Objecte mit Contouren beob achtet, so tritt sehr leicht das Phänomen des Wettstreites auf. — Ueber weiter Einzelheiten dieser Erscheinungen s. Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 30(und Helmholtz, Physiologische Optik p. 776.

Sehr leicht (und bei längerer Dauer, wie es scheint, immer) tritt bei diese Versuchen der sogenannte Wettstreit der Gesichtsfelder ein, indem bald die eine, bald die andere Farbe, oder die Farbe und die Farblosigkeit im gemein-

samen Gesichtsfelde hervortreten; namentlich wenn Hell und Dunkel im)bjecte sind, man also z. B. durch ein Fensterkreuz nach dem Himmel blickt, so sieht man bald die Ränder neben den dunkeln Rahmen, bald die ganze Scheibe sich stärker mit der einen und dann wieder mit der anderen Farbe überziehen ınd Differenzen in der Färbung sich überall geltend machen, wo Hell und Dunkel m Objecte an einander grenzen. Besonders günstig für die Erzeugung des Wettstreites finde ich ferner ziemlich dunkle Gläser, welche etwa 0,1 Licht durchassen, wenn man nur ein Gesichtsfeld färbt, oder Gläser, die ziemlich grosse lelligkeitsdifferenzen bieten, wenn man vor jedes Auge ein Glas bringt. Ausserlem ist es zweckmässig, nicht einen Punkt starr zu fixiren, sondern den Blick llmälig an den Contouren hingleiten zu lassen. — Die Wettstreitsphänomene reten gleichfalls recht lebhaft auf, wenn zwei verschiedene farbige Zeichnungen nittelst Convergenz oder Parallelstellung der Sehaxen oder im Stereoscop verinigt werden, z. B. ein verticaler rother Streifen auf gelbem Felde für das eine, in horizontaler rother Streifen auf blauem Felde für das andere Auge geboten ınd binocular vereinigt werden. (cf. PANUM, Das Sehen mit zwei Augen, Fig. 29.)

Sowohl beim Sehen durch gefärbte Gläser, als bei der Vereinigung pigmenirter Figuren tritt unter Umständen die eigenthümliche Erscheinung des mealischen Glanzes auf; in ersterer Form ist namentlich ein Versuch von)OVE (Optische Studien 1859, p. 7) frappant: auf einem blauen, nicht glänzenlen Papier liegt ein rothes, nicht glänzendes Papierstück von beliebiger Form oder ımgekehrt; hält man vor das eine Auge ein nicht zu helles blaues, vor das anere Auge ein ungefähr eben so stark verdunkelndes rothes Glas und blickt auf as rothe und blaue Papier, so erscheint dasselbe etwa wie Seide glänzend. Derelbe Erfolg tritt ein, wie WUNDT (Theorie der Sinneswahrnehmung 1862, p. 305, bdruck aus Zeitschrift f. rationelle Medicin III. Reihe, Bd. 14, — und Poggenorff's Annalen 1864, Bd. 116) erwähnt, wenn man statt der Farben blau und oth die Farben für Papiere und Gläser grün und roth oder orangefarben und iolett wählt. Ich (Physiologie der Netzhaut p. 302) habe die Erscheinung des lanzes in DOVE's Versuch daraus erklärt, dass ein rothes Papierstück durch ein laues Glas gesehen dunkel, blaues Papier aber hell erscheint und umgekehrt ein laues Papier durch rothes Glas gesehen dunkel, blaues Papier aber hell erscheint – was also dem einen Auge dunkel erscheint, erscheint dem andern hell — der ersuch ist also nur eine Modification der Dove'schen Entdeckung (Berliner Akaemie-Berichte 1851, p. 246, — DOVE, Farbenlehre 1853, p. 171, — Poggenorff's Annalen 1851, Bd. 83, p. 480), dass die stereoscopische Vereinigung einer chwarzen und weissen Fläche den Eindruck einer glänzenden Graphitfläche nacht.

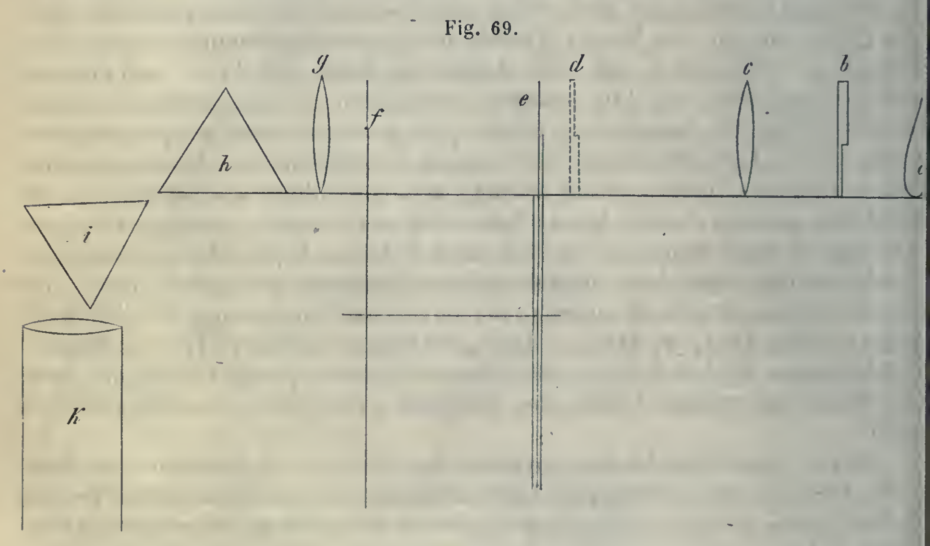
OPPELT (Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt am Main 853—1854, p. 52), HELMHOLTZ (Verhandlungen des naturhistorischen Vereins er Rheinlande 1856, p. 38), WUNDT (Theorie der Sinneswahrnehmung 1862, . 321) haben angenommen, dass die Empfindung des Glanzes auf Contrast, d. h. rosser Helligkeitsdifferenz der entsprechenden Punkte in den Gesichtsfeldern beuhe und ich (Physiologie der Netzhaut p. 303) habe nachzuweisen gesucht, dass iese Bedingung nicht blos für die Empfindung des binocularen, metallischen lanzes, sondern für alles, was wir Glanz nennen, erfordert wird. Auch BRÜCKE Viener Akademie-Berichte 1861, Bd. 43, p. 17) hat diese Bedingung als für die

Erscheinung des Glanzes nothwendig erklärt. Ich verweise wegen des Nähere auf meine Physiologie der Netzhaut p. 302 und Helmholtz, Physiologische Opti p. 782.

Zeitliche Verhältnisse beim Farbensinne.

§ 45. Ansteigen und Absteigen der Farbenempfindung wäh rend des Reizes. — In § 30 haben wir besprochen, dass eine messbare Ze erforderlich ist für einen farblosen Lichtreiz, bis das Maximum der Empfindun ausgelöst wird. Für farbiges Licht hat schon Plateau (Poggendorff's Annale 1830, Bd. 20, p. 307) den Satz ausgesprochen, dass ein Eindruck einer gewisse Zeit zu seiner vollen Bildung bedürfe. Erst Kunkel (Pflüger's Archiv 1874, Bd. IX p. 197) hat unter Fick's Leitung über dieses Problem eingehende Untersuchunge angestellt, nach einem ähnlichen Princip wie Exner für weisses Licht (s. § 30 Kunkel hat prismatische Farben beobachtet, wobei ihm eine Petroleumflamme a Lichtquelle diente, deren Licht durch zwei über einander befindliche genau stel bare Spalten von verschiedener Weite ging, so dass der obere Spalt weniger, de untere Spalt mehr Licht durchliess. Um in einem bestimmten Momente d beiden Reizungen beginnen zu lassen, und zu bestimmten und messbaren Zeite wieder abzuschneiden, bedient er sich, ähnlich wie Exner, einer rotirende Scheibe mit zwei verschieden stellbaren Sectorausschnitten (s. Figur 56 § 30) die Strahlen fallen parallel auf Prismen und endlich durch ein Fernrohr mit eine spaltförmigen Diaphragma im Oculare, um bestimmte Abschnitte des prismatische Spectrums isolirt beobachten zu können, in das Auge des Beobachters; Figur 6

Fig. 69.



zeigt die Versuchsanordnung, in welcher a die Flamme, b den Spalt, von welche die Linse c ein Bild d auf der rotirenden Scheibe e entwirft; hinter der zweite rotirenden Scheibe f wirft die Linse g das Licht parallel auf die Prismen h und und endlich geht das Licht in das Fernrohr k mit dem Diaphragma.

Kunkel geht bei seinen Versuchen von folgender Betrachtung aus: wenn ei

eiz auf eine Netzhautstelle einwirkt, so vergeht eine gewisse Zeit, bis derselbe as Maximum der Empfindung auslöst: fängt nun der eine (schwächere) von wei Reizen früher an zu wirken, als der zweite stärkere, und hören sie dann eide gleichzeitig auf zu wirken, so wird bei bestimmten Reiz- und Zeitverhält-issen eine Gleichheit der ausgelösten Empfindungen eintreten können. Das ge-essene Verhältniss der Reizgrössen zu den Zeitdauern sagt dann aus, wie viel eit der stärkere Reiz weniger braucht, um dieselbe Intensität der Empfindung iszulösen, als der schwächere Reiz zur Auslösung des Maximums der Empfindung edarf. Denkt man sich die Zeiten auf der Abscisse, die Empfindungsintensitäten s Ordinaten eingetragen, so wird durch den schwächeren Reiz in der Zeit ac ne Empfindung cx, durch den stärkeren Reiz aber in der kürzeren Zeit bc die mpfindung cx ausgelöst werden, und wenn cx dem Maximum der durch den hwächeren Reiz auslösbaren Empfindung entspricht, so wird diese Höhe cx in er kürzeren Zeit von dem stärkeren Reize ausgelöst werden. Man wird aber n Verlauf der Curve für den schwächeren Reiz finden, wenn man in verschie-enen Zeiten nach Beginn derselben ihre Ordinate misst an der Ordinate des irzere Zeit wirkenden stärkeren Reizes.

Kunkel hat nun zunächst gefunden, dass bei einer gewissen Helligkeit der chtquelle für verschiedene Theile des Spectrums zur Hervorbringung des Maxi-ums der Erregung nothwendig sind für Roth 0,0573 Sekunden, für Grün 0,097″, r Blau 0,1018″. Da die verschiedenfarbigen Theile des Spectrums von un-eicher Helligkeit sind, so hat Kunkel unter der Annahme, dass Grün doppelt so ll als Roth, und ungefähr 4 Mal so hell als Blau sei (für das Petroleumspectrum) i entsprechender Einstellung des Spaltes vor der Petroleumflamme (wobei also e Helligkeiten der 3 Farben gleich sein sollen) gefunden für die Maxima:

Roth 0,0573″, Grün 0,133″, Blau 0,0916″,

h. die verschiedenen Theile des Spectrums brauchen verschie-ene Zeit, um das Maximum der Empfindung hervorzubringen, id zwar Roth die kürzeste Zeit, dann Blau, und die längste Zeit rün. (Die in Bezug auf die Farbenfolge gegentheiligen Versuche Lamansky's rchiv f. Ophthalm. XVII. 1, p. 132] sind als nur beiläufig und mit durch nnenlicht beleuchteten Pigmenten angestellt wohl ohne weitere Bedeutung.)

Entsprechend dem Exner'schen Satze, dass die zur Erreichung des Maximums thwendigen Zeiten in arithmetischer Progression zunehmen, wenn die Hellig-iten in geometrischer Progression abnehmen, findet auch Kunkel, dass die össere Helligkeit in kürzerer Zeit das Maximum der Erregung rvorbringt, als die geringere:

Farben.	Helligkeitsverhältnisse.		
	1.	2.	4.
Roth . .	0,071″	0,0573″	—
Grün . .	0,133″	0,097″	0,0699″
Blau . .	—	0,102″	0,0916″.

Ferner hat Kunkel, gestützt auf Exner's Erfahrung, dass nahezu mit dem ginn der Reizung auch die Erregung beginnt, und unter der vorläufig zu-sigen Voraussetzung, dass der erste Theil der Erregbarkeitscurve geradlinig steigt, Curven construirt, welche die Form des Anklingens der Erregung für n schwächeren Reiz darstellen.

Von besonderem Interesse ist ferner die Beobachtung, dass sich mit d Zeitdauer der Erregung auch der Farbenton und die Farbe nüance ändert. So machte das bei dauernder Erregung grün erscheinen Stück des Spectrums beim Abschneiden der Erregung im Maximumpunkte d Eindruck eines blendenden Gelb; bei noch kürzerer Erregungsdauer erschien d ganze Spectrum aus zwei Theilen bestehend, von denen der eine den Eindru von Roth, der andere den Eindruck von Blau macht und endlich bei weiter Verminderung der Zeitdauer und Helligkeit fand Kunkel einen Punkt, wo m Ausnahme von Roth zwar noch Lichtempfindung, aber keine Fa benempfindung mehr zu Stande kommt.

Die folgende Tabelle von Kunkel giebt eine Zusammenstellung für die Spectralfarbe der zweite Stab derselben giebt die Lichtintensitäten nach der Weite des Spaltes vor d Flamme beurtheilt an:

Tabelle XXI.

Farbe.	Spaltweite in Mikromillimeter.	Dauer der Erregung in $\frac{1}{1000}$ Sekunden.	Empfindung.
Roth.	98	0,29	0
	390	0,578	Links dunkel, rechts roth.
Orange und Gelb.	98	1,156	Links roth, rechts gelb.
	390	0,29	ebenso.
Orange bis Grünlich-gelb.	98	0,868	Links gelb, rechts blau.
	195	1,736	ebenso.
	390	1,736	Links gelb mit roth, rechts grü
Grün (links grünlich-gelb).	780	0,29	Grün.
	585	0,29	Deutlich grün.
	390	0,29	Blaugrün.
	195	0,29	Blaugrün.
	98	0,29	Deutlich blau.
	98	0,868	Blau.
	98	1,736	Grün.
	49	0,29	Farbloser Lichtschimmer.
	49	1,736	Blaugrün.
	49	4,34	Deutlich blau.
	390	1,736	Grün.
Blau.	390	1,736	Schön blau.
	390	0,868	Blau.
	390	0,29	Farbloser Lichtschimmer.

Diese Angaben von Kunkel zeigen eine auffallende Aehnlichkeit mit den von mir bei se geringer Beleuchtungsintensität an lebhaften Pigmentfarben beobachteten Veränderungen d Farbentones und der Nüance (s. §40), so wie mit meinen und v. Wittich's Beobachtungen v Pigmenten unter sehr kleinem Gesichtswinkel (§ 41).

Vielleicht ist die Bemerkung nicht überflüssig, dass meine Beobachtungen über das se deutliche Erscheinen von Farben beim Ueberspringen des elektrischen Funkens (Molescho Untersuchungen 1858, V. p. 295 u. f.) mit den Beobachtungen Kunkel's durchaus nicht Widerspruche stehen, da ja die kurze Dauer des Funkens durch die grosse Intensität dessel offenbar in Bezug auf die Erregung der Empfindung äquilibrirt werden kann.

In Bezug auf HERING's Theorie der Farbenempfindung bestätigen KUNKEL's Versuche den ıtz, »dass die schwarzweisse Substanz viel reichlicher im Sehorgan enthalten ist, als die roth- üne und blaugelbe und auch diese beiden unter sich nicht gleich sind,« denn bei sehr kurz uernder und sehr schwacher Erregung afficirt eine Farbe zwar noch die schwarzweisse, er nicht mehr die farbigen Substanzen, d. h. bringt noch Lichtempfindung, aber keine rbenempfindung hervor.

Ueber den Abfall der Empfindungscurve nach Aufhören des Reizes weiss an im Allgemeinen (FECHNER), dass während des Anschauens eines farbigen Ob- ctes die Farbe desselben bald an Lebhaftigkeit verliert, sowohl bei heller, als i matter Beleuchtung, bei grossem wie bei kleinem Gesichtswinkel des Objectes. benso ist es ja auch bei farblosem Lichte (§ 30). Blickt man z. B. auf einen gen intensiv rothen Papiers, auf welchem ein Stückchen schwarzer Sammet gt, einige Sekunden lang im diffusen Tageslichte, so sieht man, dass die Farbe mer matter wird: zieht man plötzlich den Sammet weg, ohne die Augen zu wegen; so erscheint diese Stelle sehr viel intensiver roth als der übrige Papier- gen. Unter Umständen kann bei längerer Betrachtung die Farbenempfindung nz aufhören und intensives Roth oder Blau farblos erscheinen. Wenn ich 'LATEAU, Poggendorff's Annalen 1834, Bd. 32, p. 546) auf eine gut beleuchtete the Fläche durch eine 300 Mm. lange und 30 Mm. weite schwarze Röhre sehe nd einen Punkt auf dem Roth unverwandt etwa 1 Minute lang fixire, so wird dlich das Roth auf kurze Zeit dunkel und völlig farblos — nur einige helle the Kreislinien erscheinen gelegentlich in Folge kleiner Schwankungen der öhre oder des Auges. Noch rascher verschwindet die Farbe, wenn ich ein thes Quadrat unter kleinem Gesichtswinkel betrachte, z. B. ein rothes Quadrat on 3 Mm. Seite auf schwarzem oder weissem Grunde aus 400—500 Mm. Ent- rnung.

Aber auch unter Umständen, in welchen dem ganzen Gesichtsfelde nur eine stimmte Farbe geboten wird, hört die Empfindung dieser Farbe auf. MARIA OKOWA (Zeitschrift für rationelle Medicin III. Reihe 1863, Bd. 17, p. 161) hat funden[1], dass nach stundenlangem Tragen einer rothen Brille bei Abhaltung les Seitenlichtes kein Roth mehr wahrgenommen werden kann. Das the Glas darf anderes Licht nicht durchlassen. Auch ich sehe nach halbstün- gem Tragen einer solchen Brille nur noch Gelb und an dunkeln Objecten Blau, ch mehrstündigem Tragen der Brille sehe ich mattbeleuchtete Objecte farblos, elle Objecte aber, wie z. B. eine Kerzenflamme, eine von der Sonne beschienene and immer noch erst einige Sekunden lang roth. Bei dunkelblauen und dunkel- ünen Gläsern tritt für meine Augen die Farblosigkeit schon früher, etwa nach) Minuten ein. Erst neuerlichst sind Bestimmungen über die Ermüdungscurve r Farbenempfindungen von SCHÖN (Archiv f. Ophthalm. 1874, XX. 2, p. 273) ngestellt worden. SCHÖN liess mittelst eines dem Kunkel'schen in mancher Be- ehung ähnlichen Apparates Farben des Spectrums auf eine Stelle der Netzhaut nige Sekunden (3″—15″) lang einwirken und verglich dann den farbigen Ein- ruck mit dem Eindruck, welcher auf einer intacten Nachbarstelle der Netzhaut urch eine weniger intensive Farbe desselben Spectralabschnittes hervorgebracht urde. Er fand, dass beide Eindrücke einander gleich waren, wenn die Inten- tät der auf die intacte Netzhautstelle wirkenden Farbe $^1/_3$ bis $^1/_2$ von derjenigen tensität betrug, welche 10″ lang auf die erstere Netzhautstelle eingewirkt hatte.

In 7 Versuchsreihen fand Schön die Intensität für Roth = 0,43, für Grün = 0,3
für Blau = 0,31, und zwar bei verschiedenen absoluten Helligkeiten. Fern
bestimmte Schön die Ermüdungscurve für die drei Farben dahin, dass nach
die Empfindung der ermüdeten Netzhautstelle gleich war einer Empfindung a
der intacten Netzhautstelle von 0,66 für Roth, von 0,59 für Grün, 0,5 für Bla
und dann langsam abnahm:

5″: Roth 0,59, Grün 0,52, Blau 0,37,
10″: Roth 0,59, Grün 0,43, Blau 0,37,
15″: Roth 0,57, Grün 0,37, Blau 0,33.

Die Abnahme der Empfindung verhält sich also ganz ähnlich, wie nach Müller
Bestimmungen beim farblosen Lichte. cf. § 30.

Man pflegt diese Abnahme der Erregbarkeit als »Ermüdung« zu bezeichner
womit indess nichts weiter als ein bequemer Ausdruck gewonnen ist, da w
keineswegs berechtigt sind, das, was man beim Muskel Ermüdung nennt un
was ja auch als Process ganz unbekannt ist, auf Empfindungsnerven zu über
tragen.

Umgekehrt können wir nun durch derartige Versuche auch eine Zunahm
der Erregbarkeit für die Empfindung der complementären oder antagonistische
Farbe bewirken. Helmholtz (Physiol. Optik p. 369) hat gefunden, dass wen
man auf Blaugrün gesehen hat und dann auf Roth blickt, dieses gesättigter er
scheint, als wenn man vorher auf Schwarz geblickt hat. Legt man ein schwarze
und ein blaugrünes Quadrat neben einander auf rothes Papier, so erscheint, wen
man die beiden Quadrate wegnimmt, die Stelle, wo Schwarz gelegen hatte
weisslich roth, die Stelle, wo Blaugrün gelegen hatte, gesättigt roth. Helmholt
hat dasselbe für Spectralfarben gefunden und schliesst daraus, »dass die ge
sättigtsten objectiven Farben, welche existiren, die reinen Spectralfarben, im un
ermüdeten Auge nicht die gesättigtste Farbenempfindung hervorrufen, welch
überhaupt möglich ist, sondern dass wir dies erst erreichen, wenn wir das Aug
gegen die Complementärfarbe unempfindlich machen«.

Im nächsten Paragraph werden wir sehen, dass mit der Ermüdungscurv
eine so zu sagen complementäre oder antagonistische Erregungscurve abläuft.

§ 46. Farbige Nachbilder. — Mit dem Aufhören der Reizung durc
farbiges Licht hört die Empfindung von Farben nicht auf, sondern überdauert di
Reizung; die nach dem Aufhören des Reizes ablaufenden Empfindungen könne
sehr verschieden sein in Bezug auf Farbenton, Farbennüance, Helligkeit, Abwan-
delungen und Dauer. Man bezeichnet diese Empfindungen jetzt allgemein al
Nachbilder und unterscheidet auch hier positive und negative Nachbilder in Be-
zug auf die Helligkeitsverhältnisse des primären Eindrucks und des Nachbilde
— ferner gleichfarbige und complementäre Nachbilder in Bezug auf den Farben-
ton — endlich farbig abklingende Nachbilder, wenn ein Wechsel in der Färbun
des Nachbildes auftritt. Das während der Dauer des farbigen Nachbildes ein-
wirkende äussere Licht bezeichnen wir auch hier nach Helmholtz als reagirende
Licht oder reagirende Farbe. Wir haben endlich noch zu unterscheiden Nach-
bilder, welche in dem centralen Theile der Netzhaut, und solche, welche auf de
peripherischen Theilen der Netzhaut entstehen — wo nichts besonderes bemerk
wird, meint man immer die ersteren.

Farbige Nachbilder entstehen sowohl, wenn farbloses, als wenn farbiges .icht die Sehsubstanz erregt.

A. Sehr lebhaft farbige, fast die reinsten Farbenempfindungen repräsen-irende Nachbilder entstehen, wenn ein farbloses oder wenigstens überwiegend arbloses sehr lichtstarkes Object unser Sehorgan gereizt hat: wenn wir auf die onne, eine Gas- oder Lichtflamme, auf den elektrischen Funken einer Riess'schen lasche blicken, so haben wir im geschlossenen und bedeckten Auge ein Bild von em leuchtenden Objecte, welches in verschiedenen sehr intensiven und reinen 'arben erscheint und durch verschiedene Farben abklingt. Man nennt diese achbilder auch Blendungsbilder, weil wir während ihrer Dauer geblendet, d. h. icht im Stande sind, mit den getroffenen Netzhauttheilen äussere Objecte deut-ch zu erkennen. Fechner (Poggendorff's Annalen 1840, Bd. 50, p. 450), welchem ohl die umfassendsten, für seine Augen leider sehr verhängnissvollen Unter-uchungen zu danken sind, giebt folgende farbige Phasen des Nachbildes nach irecter, nur momentaner Anschauung der Sonne an: 1) weisses, schnell vor-bergehendes Nachbild, 2) lichtblau, 3) lichtgrün, 4) roth, von langer Dauer,) roth — ich finde fast genau dasselbe (Physiologie der Netzhaut p. 372). Etwas nders sind die Phasen, wenn man eine Flamme, oder den elektrischen Funken ngeschaut hat; ich verweise indess wegen dieser Specialitäten auf Helmholtz' hysiologische Optik p. 374, meine Physiologie der Netzhaut p. 347 und die An-aben in »Literatur«, und bemerke nur noch, dass der erste, welcher Beobach-ungen über das Abklingen der Nachbilder durch verschiedene Phasen gemacht at, Josephus Bonacursius (Kircher's Ars magna lucis et umbrae 1671, p. 118) ge-esen zu sein scheint.

Man bekommt aber auch farbige Nachbilder, wenn man mässig helle, nur on diffusem Tageslicht beleuchtete Objecte, z. B. weisses Papier oder den weissen der grauen Himmel durch das enster mehrere Sekunden lang nschaut, namentlich treten bei lerdings überwiegender Farb-sigkeit röthliche, gelbliche und 'üuliche Färbungen auf, welche ürzlich wieder von Hering (Wiener kademie-Berichte 1872, Bd. 66, I. Juniheft) beachtet worden sind. asselbe ist der Fall, wenn ein eisses Papierstück durch den ektrischen Funken im finstern immer beleuchtet worden ist. ubert.)

Fig. 70.



Blickt man, nachdem man ein hr helles farbloses Object ange-haut hat, auf eine dunkle oder ässig helle farblose Fläche, z. B. hwarzen Sammet, graues oder eisses Papier, den grauen Himmel, so ist die Farbenfolge wieder anders; immer ber tritt eine ganze Reihe von Abwandlungen durch verschiedene Principalfarben

auf, welche von Bewegungen der Augen im Wesentlichen unabhängig sind un
nur in Bezug auf Dauer und Intensität von denselben beeinflusst werden.

Zu den durch Reizung mit farblosem Lichte hervorgerufenen Nachbilder
müssen wohl auch diejenigen Farben gerechnet werden, welche bei langsame
Rotation von Scheiben, welche aus Schwarz und Weiss zusammengesetzt sind
auftreten. Diese Farben hat Brücke nach ihrem Entdecker als Fechner'sch
Farben (Fechner in Poggendorff's Annalen 1838, Bd. 45, p. 227) bezeichnet
Wenn man eine Scheibe wie Figur 70 mit einer Geschwindigkeit von 12 bis 4
Umdrehungen in der Sekunde rotiren lässt, so erscheint am Rande des Weiss ei
lebhaftes Blau und Gelb. Brücke (Wiener Akademie-Berichte 1864, Bd. 49) ha
zur Hervorbringung dieser Farben Scheiben wie Figur 59 (in § 31) benutzt, welch
den Vortheil bieten, gleichzeitig die Resultate verschiedener Geschwindigkeit i
der Wiederkehr des Weiss übersehen zu können. Brücke sah violett, blau, gelb-
grün, gelb — ich hauptsächlich gelb und blau — Jeder, dem ich die Scheibe
bei der angegebenen Geschwindigkeit zeigte, sah die Fechner'schen Farben seh
deutlich und war frappirt von ihrer Intensität. (Das Nähere s. Physiologie de
Netzhaut p. 379.)

Die subjective Natur der Fechner'schen Farben ist seit ihrer Entdeckung allgemein ange-
nommen worden, und unter anderem spricht auch der Umstand dafür, dass dieselben nich
gleich bei den ersten Drehungen der Scheibe, sondern erst etwas später auftreten und bei fort-
gesetzter Drehung an Lebhaftigkeit sehr zunehmen. Fechner hat das Erscheinen der Farbe
dahin erklärt, dass durch das ungleichzeitige Eintreten und Vergehen der durch die verschie-
denen farbigen Componenten des weissen Lichtes erregten Empfindungen eine Farbenempfin-
dung resultirte, oder dass die Maxima der Erregung für die das Weiss zusammensetzende
Farbenstrahlen auseinanderfielen, eine Erklärung, welche ganz in Uebereinstimmung mit de
Beobachtungen von Kunkel (s. § 45) ist. Brücke (l. c. p. 21—24) hat aber nachgewiesen, das
sich hier primäre und secundäre Erregung, d. h. Lichteindruck und Nachbild combiniren, un
diese Erklärung ist ganz in Harmonie mit den Färbungen der Nachbilder, welche man nach
dem Anschauen weisser Objecte auf dunklem Grunde hat, wenn man die Augen schliesst un
bedeckt.

Dass weisses Licht farbige Nachbilder erzeugt, würde auf dem Boden der Young-Helm-
holtz'schen Hypothese sehr begreiflich sein, da die Erregbarkeit der drei Faserarten als ver-
schieden angenommen wird, und somit auch der Abfall der Erregbarkeitscurven als verschiede
erwartet werden kann. Nach der Hering'schen Theorie würde man sich vorstellen, das
weisses Licht sowohl die schwarzweisse Substanz, als auch die rothgrüne und blaugelbe Sub-
stanz erregt, bei den beiden letzteren Substanzen aber »unter der Schwelle« bleibt, weil di
Wirkung auf diese Substanzen zu gering ist: hat die Reizung aufgehört, so wird die Erregung
der farbigen Substanzen fortdauern und zunehmen bis zu einer gewissen Intensität, währen
die Erregung der schwarzweissen Substanz schon erloschen ist. (cf. Hering, Wiener Akademie-
Berichte 1874, Bd. 69, III. § 29 und § 39.) Dasselbe würde für die Fechner'schen Farbe
gelten und aus diesen Beobachtungen kein Einwurf gegen die Hering'sche Theorie entnomme
werden können.

B. Wenn homogenes oder überhaupt farbiges Licht auf die Netzhaut ein-
wirkt, so treten theils gleichfarbige, theils complementäre (antagonistische nac
Hering) Nachbilder auf, und im Ganzen ist die Farbe der Nachbilder um so reiner
d. h. ohne Beimischung von Grau, je reiner die erregende Farbe ist. Ob die Nach-
bilder gleichfarbig oder complementär sind, ist in erster Linie abhängig von de
Dauer der primären Erregung: Helmholtz (Bericht der 34. Naturforscherver-
sammlung, Carlsruhe 1858, p. 225 und Physiol. Optik p. 367) fand, dass wen

man momentan auf gefärbte Objecte blickt und dann die Augen schliesst und bedeckt, das Nachbild positiv und gleichfarbig ist. Ich (Moleschott's Untersuchungen 1858, VIII. p. 289 u. f.) fand gleichzeitig, dass Objecte, welche momentan durch den elektrischen Funken beleuchtet werden, immer positive und meistens gleichfarbige, unter Umständen aber auch complementäre Nachbilder geben — letzteres ist wohl von besonderen Contrastwirkungen abhängig. (Ueber das Thatsächliche siehe meine Physiologie der Netzhaut p. 377.)

Von besonderem Interesse ist es aber, dass nach kurzer Dauer des primären Eindruckes ein Umschlagen des positiv gleichfarbigen Nachbildes in ein positives complementäres Nachbild eintreten kann.

Dies hat Purkinje (Beiträge zur Physiologie der Sinne 1825, II. p. 110, Figur 34) beobachtet: »Wenn man eine roth glühende Kohle mässig im Kreise bewegt, so dass die einzelnen Momente der Blendung früher Zeit gewinnen auszulöschen, ehe das Gluthbild auf seine erste Stelle zurückkehrt, so zeigt sich ein rothes Band als Spur des ersten Momentes des Eindrucks, diesem folgt ein leeres Intervall, dann das grüne Spectrum, ebenfalls in ein Band verzogen und jenem ersten im Kreise nachlaufend, endlich eine schwarze Furche, von einem grauen Nebel umgeben.« Ich sehe gleichfalls das positive complementäre Nachbild Purkinje's, nur mit der Modification, dass der rothe Streifen allmälig farblos wird und direct in den blaugrünen Streifen übergeht, ohne ein dunkles Intervall zwischen beiden. Ebenso hat Exner (Wiener Akademie-Berichte 1872, Bd. 65, III. Februarheft) die Erscheinung gesehen und in Figur I abgebildet. Brücke (ebenda 1864, Bd. 49, p. 12) hat den Versuch dahin abgeändert, dass er in eine undurchsichtige drehbare Scheibe einen Sectorabschnitt schneidet, denselben mit einem rothen Glase überdeckt und durch dasselbe auf eine Lampenflamme oder Lampenglocke blickt: dreht man die Scheibe langsam, so erscheint eine dem Purkinje'schen Nachbilde ganz ähnliche kreisförmige Figur. — Auf demselben Empfindungsvorgange beruht wohl eine von mir (Physiologie der Netzhaut p. 363) beobachtete Erscheinung: wenn eine schwarze Scheibe mit einem rothen Sector von 60° in gewöhnlichem diffusem Tageslichte mit mässiger Geschwindigkeit, etwa 8 Mal in der Sekunde, sich dreht, so erscheint sie grün mit blauen Flecken und nur hin und wieder blitzt ein rother radialer Streifen auf.

Wird das eben beschriebene positive complementäre Nachbild hervorgebracht durch Drehung der Scheibe mit rothem Glasfenster, so erscheint bei langsamer Drehung ein blaugrüner Streifen nach Vorübergang der rothen Oeffnung: bei mittlerer Geschwindigkeit, etwa 20 Umdrehungen in 1″, erscheint ein vollständiger Kranz, welcher weniger roth, aber heller ist als das rothe Fenster; bei noch schnellerem Drehen wird der Kranz röther, verliert aber an Helligkeit. Die grössere Helligkeit bei mittlerer Drehungsgeschwindigkeit unter gleichzeitiger Abnahme der Farbenintensität rührt nach Brücke's nicht zu bezweifelnder Erklärung davon her, dass sich zu der primären Empfindung das positive complementäre Nachbild addirt, worauf bereits in § 31 hingedeutet wurde.

Ein complementäres positives Nachbild hat Brücke (Poggendorff's Annalen 1851, Bd. 84, p. 443) ferner auf folgende Art erzeugt: sieht man durch ein rein rothes Glas einige Zeit auf eine helle Lichtflamme, so erscheint, wenn man die Augen schliesst, die Flamme in bläulich grüner Färbung sehr hell und deutlich. Schliesse ich die Augen mehrmals hinter einander ohne ihre Stellung zur Flamme zu verändern, so tritt das positive complementäre Nachbild noch deutlicher und lebhafter auf. Auch wenn ich den elektrischen Funken durch ein rothes Glas sehe, erhalte ich das positive complementäre Nachbild: der Funken erscheint intensiv roth mit rothem Randscheine; unmittelbar nach dem Ueberspringen er-

scheint ein ziemlich tiefgrünes Nachbild ohne Randschein (vergl. hierüber Exner, Wiener Akademie-Berichte 1872, Bd. 65, III.), dem ein blasses unbestimmt farbiges Bild folgt. — Bei den andersfarbigen Gläsern haben weder Brücke noch ich ein positives complementäres Nachbild beobachten können. — Auf die Theorie dieses Nachbildes werden wir unter *E.* zurückkommen.

C. Die negativen Nachbilder sind immer complementär gefärbt — bis jetzt wenigstens ist noch kein negatives gleichfarbiges Nachbild beschrieben worden. Man erhält sie, wenn man einige Sekunden, oder eine Minute lang oder noch länger, je nach der Empfindlichkeit des Auges, auf ein farbiges Object unverwandt blickt, dann die Augen schliesst, oder auf einen weissen, grauen oder schwarzen Grund wendet und auf demselben einen Punkt scharf fixirt: dann entwickelt sich, an Deutlichkeit und Intensität zunehmend, das negative complementäre Nachbild zu grosser Lebhaftigkeit der Färbung mit scharfen Umrissen, und vergeht dann, allmälig abnehmend, wieder ohne sonstige Veränderungen.

Wenn man die Farbe des Nachbildes schlechtweg als complementär bezeichnet, so ist das im Allgemeinen vollkommen gerechtfertigt — indess ist dabei das zu berücksichtigen, was Brücke für die Contrastfarben (s. § 43) in Bezug auf Nüancirung der Farben beobachtet hat. Es ist ausserdem zu berücksichtigen, dass besondere individuelle Ausnahmen vorkommen. Brücke (Poggendorff's Ann. 1851, Bd. 84, p. 425) giebt an, dass einer seiner Schüler von Roth ein violettes, statt eines blaugrünen Nachbildes erhalten habe — auch mein Freund Dr. Kästner auf Fehmarn, welcher die Farben sehr genau unterschied, gab, ohne von Brücke's Erfahrung etwas zu wissen, an, dass das Nachbild von Roth für ihn violett sei; im Journal de Physique par Rozier 1787, T. 30, p. 407 findet sich die Angabe, dass das Nachbild von Roth auf weissem Grunde einem Beobachter nicht grün, sondern glänzend weiss (*d'un blanc brillant*) erscheine.

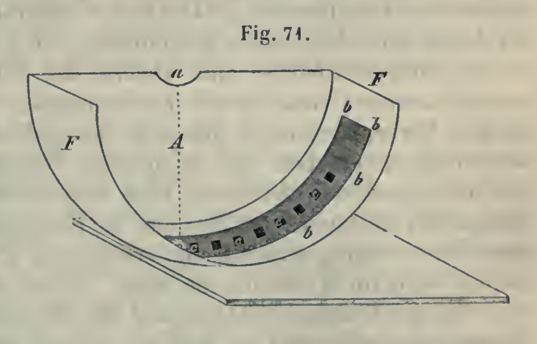
Die Dauer und Intensität dieser Nachbilder hängen theils von der Dauer und Intensität des primären Eindrucks, theils von den Einwirkungen des reagirenden Lichtes ab, theils werden sie beeinflusst von Bewegungen des Auges und der Augenlider, so wie von dem Erregungszustande der Netzhaut. Diese verschiedenen Einflüsse machen Messungen über die Dauer und Intensität der Nachbilder sehr schwierig. Das meiste in dieser Beziehung ist von Fechner (Poggendorff's Annalen 1840, Bd. 50, p. 201) beobachtet worden und dürfte etwa Folgendes festgestellt sein: abgesehen von sehr heftigen Lichteinwirkungen, wie directem Sonnenlicht, sind Dauer und Intensität des Nachbildes nicht grösser, wenn dieselben im primären Eindrucke grösser sind. Ob die Farbentöne sich verschieden verhalten, ist zweifelhaft. Das negative Nachbild dauert länger bei schwachem als bei starkem reagirenden Lichte; völlige Dunkelheit scheint nicht günstig für das Nachbild. Langsamer Wechsel von Hell und Dunkel wirkt am günstigsten. Ruhige Haltung des Auges begünstigt die Dauer und Intensität des Nachbildes. Augenblinzeln und Druck auf das Auge lassen das Nachbild momentan sehr intensiv auftreten, verkürzen aber die Dauer desselben. Morgens unmittelbar nach dem Erwachen haben mir die Nachbilder immer am intensivsten und dauerndsten geschienen.

D. Im Ganzen verhalten sich die Nachbilder auf den mehr peripherischen Zonen der Netzhaut sehr ähnlich den durch directes Sehen gewonnenen; nur ist zu bemerken, dass die sogenannten Blendungsbilder nur etwa 30° von der *Fovea*

centralis aus empfunden werden, darüber hinaus keine Blendungsbilder mehr auftreten. Förster (Hemeralopie 1857, p. 30) giebt an, dass man unter einem Winkel von 45° gegen die Sehaxe Sonnenstrahlen mehrere Sekunden lang durch die Pupille kann einfallen lassen, ohne irgend lebhafte oder andauernde Nachbilder zu bewirken — was ich bestätigen kann; nur vom elektrischen Funken habe ich Blendungsbilder auf weiter vom Centrum entfernten Theilen bekommen. (Moleschott's Untersuchungen V. p. 293.)

Für die im verbreiteten Tageslichte durch indirectes Sehen erzeugten Nachbilder hat zuerst Purkinje (Beiträge II. p. 17) angegeben, dass sie weniger intensiv erscheinen und früher verschwinden. Ich (Moleschott's Untersuchungen 1858, IV. p. 215) habe mittelst einer Vorrichtung, wie Figur 71 zeigt, einem Halbkreise von 200 Mm. Radius, in dessen Mittelpunkt sich das Auge *a* befindet, Nachbilder für den horizontalen Meridian der Netzhaut erhalten, indem auf den Halbkreis ein Papierstreifen von etwa 100 Mm. Breite gelegt wurde, auf welchem farbige Quadrate von je 1 Ctm. Seite und 1 Ctm. Entfernung von einander befestigt sind. Nachdem der Beobachter eine bestimmte Zeit lang den Mittelpunkt des mittelsten Quadrates fixirt hat, schliesst er die Augen oder projicirt die Nachbilder auf einen dicht daneben stehenden Halbkreis von schwarzem Sammet oder weissem Papier und fixirt den tiefsten Punkt desselben. — Adamück und Woinow (Archiv f. Ophthalm. 1871, XVII. 1, p. 137) haben sich einer anderen Methode bedient, welche im Wesentlichen darin besteht, dass ein farbiges Quadrat, welches auf grauem Grunde liegt, eine Zeit lang indirect gesehen und dann auf ein gegebenes Zeichen plötzlich hinweggezogen wird.

Fig. 71.



Die Resultate der Versuche sind folgende: 1) die peripherischen Nachbilder erscheinen in derselben Farbe wie die centralen (Aubert). Die entgegengesetzten Resultate von Adamück und Woinow beruhen wahrscheinlich darauf, dass sie den Gesichtswinkel für das farbige Object so klein gewählt haben, dass die Farbe beim indirecten Sehen verändert erschienen ist. Auffallender Weise haben die Autoren nichts über die Grösse der von ihnen benutzten Objecte angegeben*); 2) sie erscheinen bei ruhiger Fixation ziemlich scharf begrenzt, aber weniger intensiv, je mehr sie nach der Peripherie hin liegen (Aubert); 3) sie dauern kürzere Zeit als die centralen und zwar im Ganzen um so kürzere Zeit, je kürzere Zeit der primäre Eindruck gedauert hat (Aubert). Eine »feststehende Proportionalität« ist

*) Ich möchte bei dieser Gelegenheit den Wunsch aussprechen, dass die Beobachter, wenn sie quantitative Angaben publiciren, nicht wesentliche Grössenangaben bei Beschreibung der Versuche weglassen: so giebt z. B. Exner nichts über die Rotationsgeschwindigkeit seiner Scheiben, Kunkel nichts über die absolute Breite des constanten Spaltes an; Landolt giebt in der einen Schrift (Il Perimetro) nur den Halbmesser desselben, aber nicht die Grösse der Objecte, in der andern (III. 1, p. 69 dieses Handbuchs) die Grösse der Quadrate, aber nicht den Halbmesser an.

aus diesem Satze wohl nicht zu deduciren, wie Adamück und Woinow thun; ich habe sogar (Moleschott's Untersuchungen IV. p. 239) gesagt: »die Dauer der Nachbilder überhaupt ist sehr verschieden und zum Theil von der Dauer des primären Eindrucks abhängig« (cf. p. 227 ibid.). 4) Je peripherischer die Nachbilder sind, um so kürzere Zeit dauern sie. (Adamück und Woinow.) Ich soll diesen Satz, wie Adamück und Woinow behaupten, aufgestellt haben, was ich in Abrede stellen muss. 5) Nachdem die Nachbilder verschwunden sind, werden sie wieder sichtbar und zwar ganz unregelmässig, indem bald das eine, bald das andere Nachbild wieder auftaucht, allmälig intensiver wird und dann wieder vergeht; ein solches Verschwinden und Wiedererscheinen einzelner Nachbilder habe ich bis zu 5 Mal beobachtet. Diese Beobachtung scheint mir ein sicherer Beweis, dass die sogenannten Oscillationen (Plateau) der Nachbilder unabhängig von Bewegungen der Augen oder Augenlider vorkommen. (cf. § 32.)

E. Wir werden an eine Theorie der Nachbilder entweder den Anspruch machen können, dass sie die Erscheinungen unter möglichst einfache und der übrigen Nervenphysiologie sich anschliessende Ausdrücke subsumire, oder dass sie den physikalischen und chemischen Vorgang im Nerven nachweise. Da wir von der letzteren Anforderung noch weit entfernt sind, so werden die Bezeichnungen des Zustandes der Netzhaut als Reizungszustand und Ermüdungszustand derselben vorläufig gerechtfertigt erscheinen, so lange sie mit anderweitigen Thatsachen nicht im Widerspruche sind. Indess dürfen wir dabei nicht vergessen, dass uns der Gleichgewichtszustand der Sehsubstanz und die daraus resultirende Empfindung unbekannt ist, denn wir kennen nur Veränderungen der Empfindung, und es ist sehr misslich zu sagen, ob eine Veränderung im gegebenen Falle auf einer Ermüdung oder Reizung beruht. Das Abklingen der Blendungsbilder, die Oscillationen sind in dieser Beziehung durchaus unklar — die positiven gleichfarbigen Nachbilder können wir nicht mehr als eine Fortdauer der Erregung ansehen, da dieselben sofort negativ und complementär werden, wenn reagirendes Licht hinzukommt — nur die negativen complementären Nachbilder würden als Ermüdungszustände angesprochen werden dürfen, weil sie eine Verminderung in der Empfindung objectiver Reize bedingen. Wenn ein rothes helles Nachbild im geschlossenen und bedeckten Auge erscheint, auf grauem Papier aber ein grünes dunkles Nachbild, so kann man doch nicht sagen, dass die letztere Empfindung die Folge einer Ermüdung der rothempfindenden Fasern sei, da ja dann im lichtlosen Auge auch Grün würde empfunden werden müssen. — Das Purkinje'sche positive complementäre Nachbild hat Exner (Wiener Akademie-Berichte 1872, Bd. 65, III.) unter der für die gegebenen Verhältnisse zulässigen Annahme, dass je schwächer die Reizung, desto länger das Nachbild sei, und der weiteren Annahme, dass rein rothes Licht die grün- und blauempfindenden Fasern reize und stark genug reize, dahin erklärt, dass die rothempfindenden Fasern in diesem Experimente stark, die andern Fasern schwach gereizt würden, und deswegen die Reizung der letzteren länger dauerte und den grünblauen Streifen bildete. Unbeantwortet bleibt aber immer noch die Frage, warum nur Roth, nicht aber Blau, Grün oder Gelb ein positives complementäres Nachbild erzeugen. Ich finde in der That, dass durch die Ausdrücke »Fortdauer der Erregung« und »Ermüdung« nur eine mitunter bequeme Umschreibung der Thatsachen gewonnen wird, mit ihnen aber die Gefahr verbunden ist, das Umschriebene als erklärt anzusehen

und von weiterer Untersuchung abzustehen. Von diesem Gesichtspunkte aus scheint mir die Hering'sche Theorie mehrere Vorzüge zu haben, doch wird vorerst die weitere Entwickelung und Begründung derselben durch HERING selbst abzuwarten sein. Hervorzuheben scheint mir indess schon jetzt, dass die Bezeichnung von Assimilation und Dissimilation labiler, so zu sagen unpräjudicirlicher ist, als die von Ermüdungs- und Erregungszustand, und doch dem als wirklich vorauszusetzenden Processe in der Sehsubstanz mehr adäquat scheint.

Bevor übrigens an eine sichere und consequente Erklärung der Nachbilderscheinungen durch irgend eine Theorie gegangen werden kann, werden noch viele messende Untersuchungen über das Anklingen und Abklingen der verschiedenen Farbentöne und Farbennüancen, die Helligkeitsverhältnisse der Nachbilder zur primären Empfindung, die Einflüsse der nicht direct gereizten Netzhautpartien u. s. w. anzustellen sein — denn eine allgemein befriedigende Erklärung wird wie überall, so auch hier nur durch quantitative Bestimmungen gewonnen werden können.

§ 47. Farbenblindheit. — Die Farbenblindheit hat für die Physiologie ein Interesse, insofern das normale Auge bestimmte Grenzen bietet, über welche hinaus zwar noch Lichtempfindung, aber keine Farbenempfindung mehr stattfindet, wie wir § 37 bis § 42 gesehen haben — dann, weil man die Hoffnung gehabt hat und noch hat, aus den Empfindungen der Farbenblinden Schlüsse auf die normalen Verhältnisse und Bedingungen der Farbenempfindung machen zu können. Gerade die Untersuchungen über Farbenblindheit haben in neuerer Zeit die lebhaftesten Discussionen über die Haltbarkeit der Young-Helmholtz'schen Farbentheorie hervorgerufen, und dieselbe vielfach als unvereinbar mit den Befunden an Farbenblinden erklärt. Wir verweisen in dieser Beziehung auf die Arbeiten von OPPEL (Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt am Main 1859—60, p. 70—144, und 1860—1861, p. 42), ROSE (Archiv f. Ophth. 1861, VII. 2, p. 72), DOR (Sitzungsberichte der Berner naturforschenden Gesellschaft 1872), BRIESEWITZ (Ueber das Farbensehen etc. Diss. inaug. Greifswald 1872), SCHIRMER (Archiv f. Ophthalm. 1872, XIX. 2, p. 194), HOCHECKER (ibid. 1873, XIX. 3, p. 1), STILLING (Beiträge zur Lehre von den Farbenempfindungen 1875, Ausserordentliches Beilage-Heft zu den Klinischen Monatsblättern, XIII. Jahrgang), welche gegen die Young-Helmholtz'sche Theorie sich erklären, — während RAEHLMANN (Arch. f. Ophth. XIX. 3, p. 88), LEBER (Klinische Monatsblätter 1872, p. 467), FICK (Würzburger Verhandlungen 1873, Neue Folge V. p. 129) die Young-Helmholtz'sche Theorie unter Annahme weiterer Hypothesen über die Erregbarkeit der 3 Faserarten aufrecht erhalten. Ich bin durch diese Untersuchungen in meiner Ansicht (Physiologie der Netzhaut 1865, p. 184) nur bestärkt worden, »dass die Untersuchungen an Farbenblinden überhaupt nicht geeignet seien, für oder wider die Young'sche Theorie benutzt zu werden, weil zu viele Möglichkeiten in der Veränderung der Fasern denkbar sind, welche dem Zustandekommen einer Farbenempfindung Hindernisse bereiten können.«

In Bezug auf die Unempfindlichkeit des normalen Auges für Farben unter den oben angegebenen Verhältnissen im Vergleich zur angeborenen Farbenblindheit möchte ich aber bemerken, dass wenn auch Fälle von Farbenblindheit vorkommen, in denen nur bei Verminderung der Helligkeit oder des Gesichtswinkels

Farben nicht empfunden werden können, in der ungeheuren Mehrzahl der Fälle die Farbenblindheit keineswegs nur quantitativ von der normalen Farbenempfindlichkeit unterschieden ist. Ebenso ist auch nach Schön (Die Lehre vom Gesichtsfelde etc. Berlin 1874, p. 40) die krankhafte oder erworbene Farbenblindheit von der angeborenen Farbenblindheit vollständig zu sondern, weil bei ersterer »jede Farbenempfindung um eine gleiche Quote herabgesetzt ist.« — Diese Erwägungen schliessen ein näheres Eingehen auf die Farbenblindheit aus.

Wir erwähnen hier noch die künstliche partielle Farbenblindheit, welche durch das Santonin erzeugt wird. Etwa 15 Minuten nach dem Einnehmen von etwa 1 Grm. santoninsauren Natrons tritt ausser einigen unangenehmen Empfindungen (Uebelkeit, Müdigkeit u. dergl.) Gelbsehen oder Grünlichgelbsehen von hellen, zugleich mit Violettsehen von dunklen Objecten ein; vom Spectrum verschwindet der violette Theil. Diese Erscheinungen scheinen constant zu sein. (Rose in Virchow's Archiv 1860, XIX. p. 522, — XX. p. 245, — 1863, XXVIII. p. 30, — M. Schultze, Ueber den gelben Fleck, Bonn 1866, p. 6, — Helmholtz, Physiol. Optik p. 848, — Dor, Bibliothèque universelle de Génèves 1867, Bd. 28, p. 155 nach Meissner's Jahresbericht 1867, p. 590, — Huefner, Arch. f. Ophthalm. 1867, XIII. 2, p. 309). Ob das rothe Ende des Spectrum verkürzt ist (Schultze), ist zweifelhaft (Dor). Schultze sah im Spectrum die violette Linie des Rubidium als farblose helle Linie. Trotz der verminderten oder vernichteten Empfindlichkeit für objectives Violett ist subjectives, wohl nicht auf Contrastempfindung beruhendes Violettsehen vorhanden: dieses Violettsehen tritt nämlich früher auf, als das Gelbsehen (Rose, Huefner), daher auch die Schultze'sche Erklärung des Violettsehens als eine Wirkung des complementären Nachbildes nicht haltbar erscheint. — Für die Theorie der Farbenempfindung lassen sich, wie mir scheint, keine haltbaren Grundlagen aus den Beobachtungen im Santoninrausche gewinnen.

Ueber den Sitz der Farbenempfindung oder das Centralorgan, wo die Erregung der Opticusfasern in Farbenempfindung umgesetzt wird, hat Niemetschek (Prager Vierteljahrschrift 1868, Bd. 100, p. 224) die Thesis aufgestellt, dass dasselbe in den vorderen Windungen des Grosshirns liege, und gründet diesen Ausspruch auf die normalen Augen- und Netzhautbefunde bei Farbenblinden einerseits, anderseits auf Beobachtungen, wonach bei 4 Farbenblinden die Entfernung der beiden Augenmittelpunkte von einander geringer (= 49,5—54 Mm.) als bei normal Sehenden gefunden wurde, was von einer Verkümmerung der zwischen den Augenhöhlen eingeschobenen Stirnportion des Gehirns herrühren soll (p. 230). Niemetschek fand bei einem nur auf dem einen und zwar dem linken Auge Farbenblinden den Abstand des Hornhautrandes von der Nasenwurzel rechts = 28 Mm., links = 31 Mm. (p. 236). Ferner sollen bei Krankheitsprocessen in den vorderen Windungen des Grosshirns subjectives Farbensehen und Farbenblindheit auftreten. — Weitere Untersuchungen und Beobachtungen in grösserer Ausdehnung werden zur Prüfung dieser an sich nicht unwahrscheinlichen Hypothese Niemetschek's anzustellen sein.

§ 48. Licht- und Farbenempfindung in Folge mechanischer Reizung. — Sowohl ein kurz dauernder Druck und eine Zerrung der Netzhaut bringen auf Grund der specifischen Energie des Sehnerven Lichtempfindungen,

sogenannte Phosphene hervor, als auch ein anhaltender Druck, welcher auf das Auge ausgeübt wird.

Die erste Art von Lichtempfindungen tritt auf, wenn man mit dem Finger, einem Stecknadelknopfe und dergleichen eine Stelle an der hinteren Hälfte des Augapfels drückt und dabei die Augen geschlossen hat, oder sich im Dunkeln befindet. Es erscheint dann eine beschränkte Stelle im Gesichtsfelde leuchtend, entsprechend der gedrückten Netzhautstelle in den Raum projicirt; die Stelle ist nicht scharf contourirt, sie erscheint mir in gelblichem Lichte. Thomas Young (Philos. Transactions 1801, p. 59) gelang es, den Druck unmittelbar an der Stelle der *Fovea centralis* auszuüben, ich kann es nur bis auf etwa 15° von derselben bringen. Ausserdem bemerkt man noch eine zweite, weniger helle Stelle im Gesichtsfelde, welche der Eintrittsstelle des Sehnerven entspricht. Sonst bemerke ich im Finstern nur noch an vielen Stellen des Gesichtsfeldes helle krumme Linien, vielleicht Stücken der Aderfigur entsprechend.

Drückt man, mit geschlossenen Augen vor dem Fenster stehend, so dass das Gesichtsfeld roth erscheint, gegen die hintere Hälfte des Augapfels, so erscheint der gedrückten Stelle entsprechend ein dunkler blaugrüner Fleck, mit einem hellen Rande umgeben, ausserdem der Eintrittsstelle des Sehnerven entsprechend ein hellgelber, mit einem dunkeln Rande versehener Fleck.

Im hellen Gesichtsfelde, wenn man nach Purkinje's (Beobachtungen zur Physiologie der Sinne I. 1823, p. 138) Anweisung in den innern Augenwinkel die Ecke eines weissen Papiercartons bringt, das Auge stark nach innen wendet und an der äusseren Seite des Bulbus mit einem Stecknadelknopfe drückt, so erscheint ein dunkler Fleck mit heller Einfassung; die Gegend des fixirten Punktes erscheint als ein mattgrauer Fleck, und die Gegend der Eintrittsstelle des Sehnerven als ein grauer unbestimmter Fleck mit hellem Rande. Lasse ich mit dem Drucke plötzlich nach, so erscheint mir an der fixirten Stelle ein hellerer Fleck, die beiden andern Flecken verschwinden. Von einem System bogenförmiger Linien zwischen Druckstelle und *Fovea centralis*, wie es Purkinje (l. c. p. 139 Figur 29) und weniger deutlich Helmholtz (Physiol. Optik p. 196 Figur 1, Tafel V.) gesehen haben und abbilden, kann ich nichts bemerken (Physiol. der Netzhaut p. 338).

Den Druckbildern reihen sich einige wahrscheinlich von Zerrung der Netzhaut herrührende Lichterscheinungen an: Purkinje (l. c. p. 79) hat eine Lichterscheinung beschrieben und Figur 21 ibid. abgebildet, welche bei kräftigen Augenbewegungen nach aussen oder innen als ein feuriger Kreis im Finstern in der Gegend der *Papilla optica* auftritt — im Hellen oder wenn Licht durch die Augenlider dringt, dagegen als ein dunkler Fleck. Etwas anders ist die Erscheinung bei Helmholtz (Physiol. Optik Figur 2, Tafel V.), Czermak (Wiener Akad.-Berichte 1854, Bd. 12, p. 364 und Bd. 15, p. 455) und Aubert (l. c. p. 339). — Ferner gehört hierher das Accommodationsphosphen von Czermak (Wiener Akademie-Berichte 1857, Bd. 17, p. 78 und Arch. f. Ophth. 1860, VII. 1, p. 147), welches schon Purkinje (Beobachtungen II. p. 115) beobachtet zu haben scheint. Czermak sieht, wenn er im Finstern die Augen für die Nähe möglichst stark accommodirt hat und dann plötzlich für die Ferne accommodirt, einen ziemlich schmalen feurigen Saum an der Peripherie des Gesichtsfeldes — er erklärt diese Erscheinung aus einer Zerrung der *Ora serrata* bei der plötzlichen Abspannung des Accommodationsapparates.

Ausserdem treten nun eigenthümliche Licht- und Farbenerscheinungen auf, wenn ein gleichmässiger anhaltender Druck auf den Augapfel ausgeübt wird, welche von Elliot (Observations on the senses 1780, p. 1) und Purkinje (Beobachtungen I. p. 22—49 und II. p. 111) genau beschrieben worden sind. Die dabei erscheinenden Farben sind von wunderbarer Pracht und Reinheit, auch durch ihren steten Wechsel sehr anziehend.

Wenn ich im Finstern und bei geschlossenen Augen einen gelinden, aber gleichmässigen Druck auf den Augapfel ausübe, so erscheint in der Mitte des Gesichtsfeldes ein intensiv heller elliptischer Nebel (bei Purkinje rautenförmig), aus dessen Centrum Strahlen nach der Peripherie schiessen. Der Nebel breitet sich immer mehr nach der Peripherie des Gesichtsfeldes hin aus und es beginnen Farbenmassen vom Centrum nach der Peripherie hin zu wogen in verschiedener Abwechselung, meist zuerst ein glänzendes Blau, in dessen Centrum sich ein prächtiges Roth entwickelt und das Blau nach der Peripherie vertreibt (wie bei den sogenannten Chromatropen), dann ebenso Violett, Grün u. s. w. Zwischen diesen farbigen Wolken erscheinen in schnellem Wechsel unregelmässige dunkle Flecke, etwa den verästelten Pigmentzellen ähnlich, welche auch oft eine Art Netzwerk bilden; sie sind in steter Bewegung und ewigem Entstehen und Vergehen begriffen. Früher oder später fängt im Centrum ein lebhaftes Flimmern an, aus dem sich mehrere helle radiale Strahlen entwickeln, welche sich wie Windmühlenflügel drehen bald nach rechts, bald nach links. Zwischen diesen mehr nebelartigen, d. h. nicht scharf begrenzten Formen tritt nun zuerst an einzelnen Stellen, später immer mehr das Gesichtsfeld ausfüllend, eine regelmässige Zeichnung auf, welche aus hellen und dunkeln Vierecken besteht, die gelblich und bläulich oder weiss und braun, aber immer in matten Farbennüancen erscheinen. Bei mir nehmen sie immer nur einen Theil des Gesichtsfeldes ein und sind stellenweise unterbrochen — oft erscheinen statt ihrer regelmässige Sechsecke von anderer Farbe und Helligkeit. Purkinje hat diese Formen ganz so, wie ich sie sehe, in Figur 8, 11^b, 13 (Bd. I.), abgebildet. Bei fortdauerndem Drucke wird die Ausfüllung des Gesichtsfeldes immer lückenhafter und endlich wird es tief dunkel, und nur einzelne gelbe, geschlängelte Linien, vielleicht Stücke der Purkinje'schen Aderfigur treten auf. —Bei starkem Drucke gehen diese Erscheinungen rasch vorüber und das Gesichtsfeld wird dunkel. Werden während des Druckes Augenlidbewegungen gemacht, so wechseln die Erscheinungen in Farbe und Lichtintensität. — Beim Nachlassen des Druckes oder vollständiger Aufhebung desselben tritt ein unentwirrbares Gewimmel von hellen, durch das Gesichtsfeld schiessenden Funken und Linien auf, welches Helmholtz sehr passend mit den Empfindungen nach Aufhören des Druckes auf den *N. ischiadicus* vergleicht, ausserdem tauchen die Vierecke, Stücke der Aderfigur, wirbelnde Figuren in verschiedenen Gegenden des Gesichtsfeldes auf, welche allmälig verschwinden — jeder Lidschlag bringt aber grosse Helligkeit des Gesichtsfeldes und deutlicheres Auftreten der Figuren hervor.

Vierordt (Archiv für physiol. Heilkunde 1856, p. 567 und Grundriss der Physiologie 1862, p. 337) und Laiblin (Die Wahrnehmung der Chorioidealgefässe, Diss. inaug. Tübingen 1856) beschreiben ein nach längerer Zeit fortgesetztem, allmälig zunehmendem Drucke auftretendes rothes Netzwerk mit schwarzen Zwischenräumen, welches sie als die innerste Gefässschicht der Chorioidea deuten, und vor ihm Stücke der Netzhautvenen von bläulich silberglänzender Farbe. Meissner (Zeitschrift für rationelle Medicin III. Reihe, Bd. 1, p. 568, Jahresbericht für 1856), Helmholtz (Physiol. Optik 1860, p. 198) und ich (Physiologie der Netzhaut p. 341) haben diese Erscheinungen nicht sehen können.

Wenn man ferner bei geöffnetem Auge einen continuirlichen Druck auf den Bulbus wirken lässt, so treten theils Verdunkelung des Gesichtsfeldes, theils besondere subjective Erscheinungen ein. Die Verdunkelung des

Gesichtsfeldes beginnt an der Peripherie, schreitet nach dem fixirten Punkte zu allmälig fort, indem die gesehenen Objecte verschwinden, und bei ruhiger Haltung des Auges kann auch der fixirte Punkt verschwinden, nachdem derselbe immer dunkler geworden ist. Ausserdem treten, wenn man auf ein gleichmässig beleuchtetes Object, z. B. den Himmel oder einen Bogen weisses Papier, blickt, verschiedene subjective Erscheinungen auf, und zwar ein dunkler Fleck um die fixirte Stelle, an Grösse etwa der *Fovea centralis* entsprechend und ausserdem Pulsationserscheinungen; die Phänomene sind von Purkinje (Beobachtungen Bd. I. p. 125 und 134), mir (Physiol. der Netzhaut p. 342), Pope (Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde I. 1, 1869, p. 72 und 1870, I. 2, p. 197) und Reich (Klinische Monatsblätter 1874, p. 238) genauer beschrieben worden und scheinen individuell im Einzelnen ziemlich verschieden zu sein; von Einfluss ist jedenfalls die Stärke des Druckes.

Als Druckphänomene sind ferner wohl zwei von Purkinje (l. c. I. p. 125 und II. p. 78) beobachtete Erscheinungen zu deuten, nämlich erstens ein Fleck in der Mitte des Gesichtsfeldes beim angestrengten Nahesehen: bei mir ist der helle Fleck um den fixirten Punkt von einem dunkleren, mattvioletten Hofe umgeben und verschwindet beim Nachlassen der Accommodation; Helmholtz (Physiologische Optik p. 199) hat einen dunkeln Fleck, am Rande braun abschattirt, gesehen. — Zweitens hat Purkinje eine mattleuchtende elliptische Fläche gesehen, wenn er im Dunkeln bei stark zusammengekniffenen Augenlidern fest nach oben sah und dann plötzlich den Schliessmuskel erschlaffen liess. Auch ich sehe diese mattgraue elliptische Fläche, welche nur momentan erscheint und sich dann in Nebel auflöst, die nach aufwärts und abwärts wogen.

Kürzlich hat Reich (Klinische Monatsblätter 1874, p. 247) auch Veränderungen in der Farbenperception beobachtet bei continuirlichem Druck auf das Auge, indem er durch farbige Gläser auf eine helle Wand oder in eine Kerzenflamme blickte, und findet folgende Uebergänge der Empfindung: Roth geht durch orange und gelb, Grün durch grünlichgelb und gelb, Blau durch schwachviolett in grauweiss und dann in Finsterniss über; er glaubt zu finden, »dass Steigerung des intraocularen Druckes die centralen Theile der Netzhaut in solche Bedingungen stellt, dass ihre Farbenperception einigermassen den peripheren Netzhauttheilen analog wird.«

§ 49. Lichtempfindung bei elektrischer Reizung. — Die specifische Energie der Sehnerven, auf Reizung Licht zu empfinden, ergiebt sich ferner aus den Resultaten der elektrischen Reizung. Dass durch Stromesschwankungen Lichtempfindungen hervorgebracht werden, ist schon seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts bekannt (Le Roy, Mémoires de Mathématique et de Physique de l'Acad. de France, année 1755, p. 86 in Histoire de l'Academie royale des Sciences 1761); dass während der Wirkung eines constanten Stromes Lichtempfindung auftritt, scheint zuerst Ritter (Beiträge zur näheren Kenntniss des Galvanismus 1801 und Gilbert's Annalen der Physik 1801, Bd. 7, p. 448—1805, Bd. 19, p. 6) gefunden zu haben. Stromesschwankungen enthält man bei der Entladung von Kleist'schen oder Leydener Flaschen: die dabei auftretenden Lichtblitze sind mit sehr unangenehmen (vielleicht auch gefährlichen) Erschütterungen verbunden, und daher diese Methode nicht zu empfehlen. Sehr viel zweckmässiger ist es,

die Schwankungen galvanischer Ströme zu benutzen: nach längerem Aufenthalte im Finstern genügt bei mir ein einfaches Plattenpaar zur Hervorbringung eines Lichtblitzes — deutlicher sind die Lichterscheinungen bei Benutzung einer galvanischen Säule. Helmholtz (Physiol. Optik p. 204) wendet sehr zweckmässig eine Säule von 12 Daniell'schen Elementen an, welche lange genug constant bleibt, und leitet zur Vermeidung störender Nebenwirkungen den Strom durch mit Salzlösung getränkte Pappstücke in den Körper.

Bei Schliessung und Oeffnung der Kette treten Lichtblitze auf, und zwar finden Helmholtz und ich (Physiol. der Netzhaut p. 345) den Oeffnungsblitz stärker bei absteigendem Strome, schwächer bei aufsteigendem Strome, als den Schliessungsblitz.

Während der Strom geschlossen ist, erfährt die Lichtempfindung eine Veränderung: bei aufsteigendem Strome erscheint im Finstern das Gesichtsfeld in hellerem, violettem oder bläulichem Lichte, besonders hell in der Gegend des gelben Fleckes — bei absteigendem Strome dunkler und grünlich oder gelblich tingirt; kurze Zeit nach der Unterbrechung des Stromes tritt die entgegengesetzte Veränderung, eine Umkehr der Empfindung ein. Die Eintrittsstellen des Sehnerven erschienen Purkinje (Beobachtungen I. p. 51 und II. p. 36) und Helmholtz (Physiol. Optik p. 204) als dunkle Scheiben bei aufsteigendem Strome, mir als gelbe helle Ringe mit dunklem Kerne, Purkinje und mir bei absteigendem Strome als hellere, schwach violette Scheiben. Bewegt man die Augen, während der Sehnerv von dem auf- oder absteigenden Strome durchflossen wird, so erscheint eine grosse Helligkeit im ganzen Gesichtsfelde, besonders nach der Peripherie hin. Viele der Erscheinungen sind abgebildet bei Purkinje, Beobachtungen II. Figur 4—22. Ritter (Gilbert's Annalen VII. p. 469) und Purkinje (II. p. 41) haben schon beobachtet, dass äussere Objecte bei aufsteigendem Strome undeutlicher, bei absteigendem Strome deutlicher erscheinen, was Purkinje dahin erklärt, dass die Verminderung des deutlichen Sehens von einer Verdeckung durch das vermehrte Eigenlicht der Netzhaut herrühre. Diese Annahme wird auch durch die Untersuchungen von Schliephake (Pflüger's Archiv 1874, VIII. p. 570) bestätigt. Schelske (Archiv f. Ophthalm. IX. 3, 1863, p. 39) fand, dass Objecte, welche während des aufsteigenden Stromes beobachtet werden, in mehr bläulicher, während des absteigenden Stromes in röthlichgelber Farbe erscheinen; so erschien z. B. ein Orange im aufsteigenden Strom ebenso, wie eine Mischung von 331 Orange und 29 Blau im absteigenden Strome.

§ 50. Verschiedene subjective Lichterscheinungen. — Wir erwähnen hier noch einige Erscheinungen, welche eben so wenig wie die in § 48 und 49 besprochenen als auf anatomischen Verhältnissen oder auf bestimmten Reizbarkeitsveränderungen beruhende Phänomene gedeutet werden können, und denen daher noch keine bestimmte Stelle angewiesen werden kann. Besonders viele derartige Erscheinungen hat Purkinje (Beobachtungen I. und II.) beobachtet und beschrieben, doch ist von vielen derselben bis jetzt noch nicht festgestellt, ob dieselben auf individuellen Eigenschaften von Purkinje's Augen beruht haben, oder ob sie allgemeine Geltung haben.

1) Purkinje's elliptische Lichtstreifen (II. p. 74, Figur 23—25) sind beim Ansehen eines glimmenden Schwammes im Finstern beobachtet worden

venn das Bild desselben nach innen von dem fixirten Punkte lag, als zwei von em Umfange des leuchtenden Bildes ausgehende und quer nach aussen verufende Hörner, mit ihrer Convexität nach oben und unten, so dass sie eine Ellipse zwischen dem leuchtenden Objecte und der Eintrittsstelle des Sehnerven ilden. Sie sind später von Czermak (Wiener Akademie-Berichte Bd. 43, 1861, . 163), von van Willigen (Poggendorff's Annalen 1857, Bd. 102, p. 147), von Heinrich Müller (Würzburger Verhandlungen 1859, Bd. IX, p. XXX) und von Exner (Pflüger's Archiv I. 1868, p. 392) beobachtet worden unter ähnlichen Bedingungen. Die Streifen zeigen Verschiebungen, wenn die Lichtquelle bevegt wird.

2) Purkinje's Kreuzspinnengewebefigur (II. p. 86, Figur 28—32) cheint bis jetzt nur von Purkinje beobachtet worden zu sein und zwar beim Ervachen, wenn die noch geschlossenen Augen von der Sonne beschienen wurden.

3) Eine Reihe von verschiedenen Erscheinungen schliesst sich an Purkinje's Lichtschattenfigur (I. p. 10, Figur 1—4), Bilder, welche gesehen werden bei abwechselnder Beleuchtung und Beschattung der Augen, wenn man z. B. die geschlossenen Augen gegen die Sonne oder den hellen Himmel wendet und die usgespreizten Finger vor denselben rasch hin und her bewegt (Purkinje), oder durch die Löcher oder Spalten einer rotirenden Scheibe auf den gleichmässig umvölkten Himmel blickt (Czermak). Als primäre Erscheinung betrachtet Purkinje hierbei eine schachbrettartige Würfelung des ganzen Gesichtsfeldes, welche Czermak (Wiener Akademie-Berichte Bd. 41, 1860, p. 644) als entoptisches vergrössertes Bild der Zapfenschicht zu deuten geneigt ist (cf. Exner in Pflüger's Archiv III. 1870, p. 233) — als secundäre Erscheinungen besondere Gestalten, velche er als Schneckenrechteck, Achtstrahl u. s. w. bezeichnet.

4) Helle, unregelmässig aufblitzende oder in regelmässigen Bahnen sich bevegende Punkte sind beim Sehen auf gleichmässig helle Flächen unter verschielenen Umständen von vielen Beobachtern gesehen worden, ohne dass sich angeben lässt, wie weit hierbei etwa entoptisch erscheinende Blutkörperchen im Spiele sind. (cf. Purkinje, I. p. 63 u. 127 — Joh. Müller, Handbuch der Physiologie II. 1840, p. 390 — Helmholtz, Physiol. Optik p. 424.)

5) Der Maxwell'sche Ring, wahrscheinlich ein Bild des gelben Fleckes (Maxwell, Edinburgh Journal IV. 1856, p. 337 und Helmholtz, Physiol. Optik p. 420), erscheint als ein matt begrenzter Hof um die *Fovea centralis*, wenn man mit ausgeruhtem Auge auf eine graue, noch besser auf eine blaue gleichmässige Fläche blickt, z. B. auf den weissen Himmel durch ein blaues Glas sieht. Er tritt als ein dunklerer Hof um die hellere Netzhautgrube herum auf, wenn man auf eine blaue Fläche sieht und die gespreizten Finger vor den Augen bewegt. (Exner, Pflüger's Archiv I. 1868, p. 376 und Figur 1, Tafel VIII.)

6) Die Haidinger'schen Polarisationsbüschel (Poggendorff's Ann. 1844, Bd. 63, p. 29, Bd. 67, p. 435, Bd. 68, p. 73 und 305, Bd. 85, p. 350, Bd. 93, p. 318 — Helmholtz, Phys. Optik p. 421, Tafel V. Figur 3) erscheinen, wenn man durch ein Nicol'sches Prisma nach einem weissen Papierblatt oder nach dem weissen Himmel blickt, auf kurze Zeit als zwei in der Richtung der Polarisationsebene gelegene, mit ihren Spitzen zusammenstossende dunklere und gelbliche Büschel — rechtwinklig zu ihnen und zwischen ihnen bemerkt man zwei hellere, complementär gefärbte Büschel. Die Büschel schwinden bald wieder,

doch kann man sie beim Drehen des Nicol'schen Prismas, mit welchem die Busch sich gleichfalls drehen, eine Zeit lang beobachten. Die Ausdehnung der Polar sationsbüschel entspricht etwa dem gelben Flecke.

7) Der Loewe'sche Ring (HAIDINGER in Poggendorff's Annalen Bd. 7(1847, p. 403, Bd. 88, 1852, p. 451 — HELMHOLTZ, Physiol. Optik p. 419 — EXNI in Pflüger's Archiv I. 1868, p. 376, Tafel VIII. Figur 1) wurde von LOEWE ge sehen, als er durch eine Auflösung von Chromchlorid auf eine helle Fläche blickte und erschien als ein heller, violetter Ring, welcher grösser ist als der Maxwell'sch Ring. HELMHOLTZ und EXNER sehen ihn als rhombischen Hof, welcher den Max well'schen Ring umgiebt. Der Loewe'sche Ring erscheint auch im rein blaue oder mit vielem Blau gemischten Lichte.

8) Die Exner'schen Farbenfiguren (Pflüger's Archiv I. 1868, p. 382 Tafel VIII. Figur 2—6) erscheinen, wenn homogenes rothes, grünes und blaue Licht mit Unterbrechungen in das Auge fällt: die rothe Farbenfigur erschein EXNER als eine medusenartig verzweigte Zeichnung, deren Centrum in der *Macul lutea* liegt — die grüne Farbenfigur besteht aus einer Menge kleiner schwarze Punkte, welche in gleichmässigen Abständen das grüne Feld bedecken — endlic die blaue Farbenfigur aus dunkelblauen, grösseren, weniger scharfbegrenzte und weniger regelmässig angeordneten Punkten.

III. Wahrnehmung des Raumes.

§ 51. Verhältniss der Empfindung zur Wahrnehmung. — Sprachlich unterscheiden wir Empfindung und Wahrnehmung so, dass wir Em pfindungen als Vorgänge, welche lediglich im Subjecte stattfinden und auf das selbe bezogen werden, ansehen — Wahrnehmungen dagegen als Vorgänge, welch ausser uns stattfinden und eine Beziehung zwischen uns und dem Objecte be deuten. Die Empfindung: warm, hell, schwer setzt kein Object voraus — di Wahrnehmung des Hellen, des Farbigen setzt voraus das Vorhandensein eine Hellen, welches die Ursache unserer Empfindung ist. Wir bleiben in vollkomme ner Harmonie mit der sprachlichen Unterscheidung, wenn wir sagen: die Em pfindung ist der sinnliche Antheil einer Wahrnehmung; daraus folgt dann, dass zu einer Wahrnehmung noch andere Elemente erfordert werden. Zu einer Em pfindung genügt das Ich — zu einer Wahrnehmung wird erfordert ausser den Ich das Ausser-Mir. Das Correlat des Ausser-Mir ist nichts Sinnliches, sonderr ein sogenanntes Psychisches, und zwar eine Function in ebenso bestimmter Form, wie es die Empfindung ist, nämlich eine Function in der Form der reinen Vor stellung des Raumes.

Die Wahrnehmung ist also, wenn wir es positiv ausdrücken, die Combinatior von Empfindung mit der Vorstellung des Raumes. Beide Functionen, so wie die Fähigkeit, beide Functionen zu einander in Beziehung zu setzen, sind uns au der jetzigen Stufe der Entwickelung des Menschengeschlechts angeboren, und

icht nur dem Menschen, sondern auch sehr vielen Thieren. Wenn ein eben ısgekrochenes Hühnchen nach dem Futter läuft, so setzt das nicht blos Empfinung, sondern auch Wahrnehmung voraus.

Durch die Function der Empfindung zu der Vorstellung des Raumes zu ommen, ist eben so unmöglich, wie durch dieselbe zu dem Begriffe der Causaiät zu gelangen (Kant, Kritik der reinen Vernunft 1828, Erster Theil, erster Abhnitt p. 28), und wir sind in der That auch nur im Stande, die Combination on Empfindung und Vorstellung eintreten zu lassen, indem wir die Empfindung s rein subjective Function aufgeben und vollständig der Vorstellung unterordnen. mpfindungen, welche wir nicht den Vorstellungen unterordnen, z. B. der hmerz, können nicht zu Wahrnehmungen werden — die Empfindungen des chtes ordnen wir aber so consequent unserer Vorstellung unter, dass sie uns r nicht als Empfindungen zum Bewusstsein kommen, sondern als Eigenschaften umlich vorgestellter Dinge.

Die Empfindung wird nun der Vorstellung des Raumes angepasst oder im nne der Vorstellung ausgelegt, und wir müssen festhalten, dass die Empfinıngen alle qualitativ verschieden sind und an und für sich nie räumlich sein nnen. Wenn ich die Empfindung von Dunkel mit einem hellen Punkte habe, ist diese qualitativ verschieden von der Empfindung: Dunkel mit zwei hellen ınkten, ohne dass in der Empfindung etwas von eins oder zwei enthalten ist er gar von einem Verhältniss zwischen den beiden Punkten; denken wir uns e Empfindung: Dunkel mit 2 hellen Punkten, welche in der einen Empfindung cht an einander, in der folgenden weiter von einander entfernt, in der dritten s $n$ten noch weiter von einander entfernt sind, so erhalten wir n qualitativ verniedene Empfindungen. Man ist zu dieser Auffassung wenig geneigt, weil man eiss, dass auf der Netzhaut einzelne Empfindungselemente sind, die man sich t Nervenfasern bis zum Bewusstseinsorgan hin verbunden denkt — wo aber e Empfindung ausgelöst wird, da stellt man sich dann ein congruentes oder rrespondirendes Bild der Netzhaut vor, von welchem die Empfindung abgelesen rd, oder eine Art Claviatur, welche die Oertlichkeit einer isolirten Empfindung giebt. Damit ist indess nur das Problem weiter hinaus in unbekannte Regionen rschoben, aber nicht gelöst. Die obigen n-Empfindungen haben aber qualitativ ne Aehnlichkeit, und so, wie wir verschiedenes Grau qualitativ ähnlich empfinn, und diese Qualitäten als eine Reihe von quantitativ verschiedenen Helligiten auffassen, so fassen wir auch jene n-Empfindungen als eine zusammenhörige Reihe von Qualitäten auf, welche wir aus unbekannten Ursachen als umlich different deuten.

Ohne hier auf die Frage nach der Realität des Objectiven einzugehen, wollen r dasselbe der Einfachheit wegen congruent unsern Wahrnehmungen wenigstens räumlicher Beziehung setzen. Wir werden uns dann zunächst eine Vorrichtung denken haben, durch die es möglich wird, etwa 3 helle Punkte im Dunkel lers zu empfinden, als einen hellen Punkt von der dreifachen Helligkeit im nkel. Ein Mensch mit Cataract wird diese Vorrichtung nicht haben, eben so nig ein Mensch, bei welchem sämmtliche Stäbchen und Zapfen bis auf einen stört sind, eben so wenig aber auch ein Mensch, dessen sämmtliche Opticusern im Gehirn in einem Punkt oder in einer ganz gleichmässigen Masse enten. Es sind also jedenfalls Vorrichtungen erforderlich, um objectiv Räum-

liches in qualitativ verschieden Empfindbares und als räumlich Auslegbares z
unserm Sensorium gelangen zu lassen, aber diese Vorrichtungen gestatten keinen
Schluss auf die Qualität des Zur-Empfindung-Kommens. Unsere Empfindunge
müssen daher behufs räumlicher Auslegung mit einem »Localzeichen« (s. Lotz
Medicinische Psychologie 1862, § 287, p. 328) versehen sein, um in die rei
Vorstellung des Raumes eingetragen werden zu können. Ich will einen Verglei
brauchen: ein Alphabet ist für den civilisirten Menschen eine Reihe von qual
tativ verschiedenen Lauten; jeder dieser Laute hat ohne allen inneren Grur
seine bestimmte Stellung zu jedem andern Laute des Alphabets, und sobald e
Laut gehört wird, erregt er die Vorstellung seiner Beziehung, d. h. seiner La
zu den übrigen Lautrepräsentanten oder Buchstaben: hier ist also der qualitati
Unterschied zu einem räumlichen geworden. Auf gleiche Weise ist es denkba
dass qualitativ verschieden Empfundenes in die Vorstellung des Raumes eing
tragen wird und Reihen im Raume bildet.

Durch Eintragung der Empfindungen in die Vorstellung des Raumes wi
dann eine Ausfüllung des vorgestellten Raumes gegeben — oder die reine Vo
stellung des Raumes wird zu einer synthetischen Vorstellung. Den Raum stell
wir uns, als das einfachste, nach allen Richtungen hin ausgedehnt und continui
lich vor. Die Vorstellung der Continuität wird von uns so weit festgehalten, a
die Empfindungen dieser Vorstellung nicht widersprechen — die Richtungen r
duciren wir aber auf drei Dimensionen, eine Reduction, welche auch wieder u
abhängig von Empfindungen ist und aus Verstandesthätigkeiten resultirt. (Kan
l. c. p. 31.)

Wenn von Seiten der Empfindung eine Einrichtung gegeben ist, um ei
Combination der Empfindungen mit der Vorstellung des Raumes möglich z
machen, so ist anderseits eine Thätigkeit des Verstandes erforderlich, um ei
Begrenzung der Empfindungen nach den Dimensionen des Raumes möglich z
machen. Diese Thätigkeit besteht in der Bildung oder Vorstellung allgemein
(zunächst mathematischer) Formen: Punkt, Linie, Dreieck, Kreis u. s. w., a
welche die qualitativ oder potentiell räumlichen Empfindungen bezogen werde
Die Bildung jener allgemeinen Formen oder Schemata hat Kant (l. c. p. 13
Schematismus des reinen Verstandes genannt.

Wenn nun der Verstand Schemata in dem Raume bildet und wir auf die
unsere Empfindungen beziehen, so ist damit zugleich gesagt, dass wir die En
pfindungen nicht in uns selbst verlegen, sondern sie auch in den Raum, d. h
nach aussen versetzen oder in den vorgestellten Raum projiciren müssen. Wer
also eine Lichtempfindung in unserm Sensorium zu Stande kommt, so wird s
in den Raum projicirt, und ist sie derart, dass sie auf ein Schema übertrage
werden kann, so bildet sie mit diesem zusammen eine Anschauung. Inde
wir unbewusst die Voraussetzung machen, dass der Empfindung eine Ursach
und zwar eine der Anschauung congruente Realität zu Grunde liegt, nennen w
sie eine Wahrnehmung.

Jede Form können wir uns zusammengesetzt denken aus einer Anzahl vo
materiellen Punkten und in der Empfindung, welche zu der Wahrnehmung ein
Form führt, wird gleichfalls eine Anzahl von Punkten unterschieden werde
können, welche die Form zusammensetzen. Die Menge der Punkte, welche ei
zeln empfunden werden können, wird massgebend sein für die Genauigkeit d

Wahrnehmung. Die eine Aufgabe wird also sein: die Fähigkeit der Unterscheidung von Punkten durch das Empfindungsorgan, die Empfindung des Raumes oder den Raumsinn zu untersuchen.

Die zweite Aufgabe wird sein, die Projection der Empfindungen in den Raum zu untersuchen, und wir haben dabei die von unserm Verstande construirten Dimensionen des Raumes zu Grunde zu legen.

Die Wahrnehmung wird aber noch durch ein drittes Moment beeinflusst, durch die Bewegung unserer Empfindungsorgane im Raume, und zwar die Veränderung des Ortes unserer Empfindungsorgane gegen einander. Wären wir und unsere Empfindungsorgane unbeweglich im Raume, so würde die Localisirung unserer Empfindungen verhältnissmässig einfach, aber allerdings auch ohne Interesse sein. Durch die Bewegung unserer Empfindungsorgane im Raume wird es aber nothwendig, dass ein Rapport besteht zwischen unsern Bewegungen und den in den Raum projicirten Empfindungen. Wir haben in der That die Fähigkeit, unsere Bewegungen im Raume zu bestimmen und zwar zu messen mit Hülfe unserer Empfindungsorgane, und indem wir einen beständigen Rapport zwischen Bewegungen und Empfindungen unterhalten, bleiben wir im Raume orientirt. Endlich finden auch noch Bewegungen statt, mittelst derer die in unserem Sensorium registrirten räumlichen Localzeichen gegen einander verschoben werden, die Augenbewegungen. Da auch diese Bewegungen bewusste und mit Empfindungen in Rapport stehende sind, so wird dadurch unsere Orientirung nicht nur nicht gestört, sondern wesentlich unterstützt und controlirt.

Es ergeben sich also folgende Aufgaben: 1) Untersuchung des Raumsinnes; 2) Untersuchung der Projection unserer Empfindungen; 3) Untersuchung der Augenbewegungen.

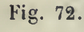
C. Der Raumsinn.

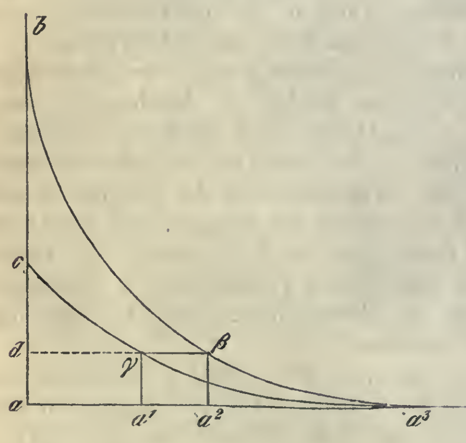
§ 52. Empfindung des Räumlichen. Wahrnehmung kleinster Punkte. — Ein Mechanismus, welcher die Wahrnehmbarkeit von Objecten im Raume, welche die verschiedenste Ausdehnung haben, für unser Empfindungsorgan vermitteln soll, muss aus einer Anzahl von Elementen oder Punkten bestehen, deren jeder einzelne eine Empfindung vermitteln kann. Die aus solchen isolirt empfindenden Punkten zusammengesetzte Fläche, die Netzhaut, ist unmittelbar hinter den brechenden Medien so angebracht, dass das Bild eines leuchtenden Punktes der Aussenwelt gleichfalls als ein Punkt auf sie fällt und eines ihrer Elemente in Erregung setzt, ohne die übrigen Elemente der Netzhaut zu erregen, oder wenigstens ohne sie in gleicher Weise zu erregen. Ein Punkt ist aber ein relativer Begriff, ein Element desgleichen, und es entsteht die Frage: 1) wie gross ist das kleinste Bild eines leuchtenden Punktes auf der Netzhaut? 2) ist dies Bild grösser oder kleiner als ein Element der Netzhaut? 3) sind die Zapfen die empfindenden Elemente der Netzhaut?

Die Beantwortung der ersten Frage, wie gross das kleinste Netzhautbild von einem leuchtenden wirklichen Punkte ist, hat mancherlei Schwierigkeiten. Wirkliche Punkte, welche leuchten und isolirt sind in ihrer Umgebung sind die Fixsterne, denn ihr scheinbarer Durchmesser ist auch bei 1000maliger Vergrösserung immer unverändert — aber ihr Bild auf der Netzhaut ist von verschiedener Grösse

und sie erscheinen in den besten Fernröhren als kleine Fläche und nach ihrer Helligkeit verschieden; die Helligkeit ist, wie wir sogleich sehen werden, massgebend für die Grösse des wahrnehmbaren Netzhautbildes, und die sogenannten Sterngrössen sind nur Sternhelligkeiten. Auch im Telescop erscheinen sehr helle Sterne grösser und nehmen an Grösse scheinbar ab, wenn sie lichtschwächer werden. (William Hershel, Philos. Transactions 1803, p. 224.) William Hershel u. A. haben die »*spurious discs*« der Fixsterne vielfach untersucht und sich bemüht, ihre Grösse zu bestimmen. Arago (Astronomie I. p. 364, Humboldt, Kosmos III. p. 67 und 113) schreibt den Sternen einen *diamètre sensible et factice* zu, welcher mit der Güte des Fernrohrs und mit der Stärke der Vergrösserung abnimmt, aber immer noch eine gewisse Grösse repräsentirt.

Bei der Beschaffenheit der brechenden Medien des Auges müssen wir annehmen, dass auch bei vollkommenster Accommodation die Vereinigung der Lichtstrahlen zu einem Punkte nicht eine vollkommene sein kann (s. § 18). Gleichwohl wird der Gang der Lichtstrahlen in den brechenden Medien derselbe sein für sehr helle, wie für sehr wenig leuchtende Sterne und mithin das Netzhautbild eines Sternes erster Grösse ebenso wie das eines Sternes fünfter Grösse. Dass trotzdem ein sehr heller Stern grösser zu sein scheint, als ein lichtschwächerer, hat Volkmann (Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik 1863 I. p. 38 und 39) in folgender Weise erklärt: wegen der Lichtzerstreuung in den Augenmedien wird das Netzhautbild einen Zerstreuungskreis bilden, in dessen Centrum die grösste Helligkeit, von dem Centrum ab aber eine Abnahme zur Peripherie hin stattfindet: von diesem Zerstreuungskreise wird aber nur derjenige (centrale) Theil wahrgenommen werden, welcher eine mehr der centralen als der peripherischen sich annähernde und überhaupt eine verhältnissmässig grosse Helligkeit hat. Ist also der leuchtende Punkt lichtstark, so wird die Ausdehnung, in welcher der Zerstreuungskreis wahrgenommen werden kann, eine grössere sein, als wenn der leuchtende Punkt lichtschwach ist. Volkmann unterscheidet daher die physikalische und die sensible, d. h. wahrnehmbare Grenze des Zerstreuungskreises.


Fig. 72.



Bedeutet in Figur 72 aa^3 den Radius eines Zerstreuungskreises, ab die Grösse der Helligkeit im Centrum desselben für einen Stern erster Grösse, ac die Grösse derselben für einen Stern dritter Grösse, und sei die allmälige Abnahme der Helligkeit nach der Peripherie hin durch die Curven $b\beta a^3$ bezw. $c\gamma a^3$ ausgedrückt, so wird, wenn ad eine Helligkeit bezeichnet, welche der Grenze der Wahrnehmbarkeit entspricht, die Grenze der Wahrnehmbarkeit oder die sensible Grenze für den lichtstarken Stern bei a^2, für den lichtschwachen Stern schon bei a^1 liegen, da $ad = a^1\gamma = a^2\beta$ ist. Allgemein können wir also sagen: je mehr ein Punkt

an Helligkeit gegen seine Umgebung contrastirt, um so grösser ist der wahrnehmbare Theil seines Netzhautbildes, und umgekehrt.

Die sensible Grenze Volkmann's, den *diamètre sensible* Arago's zu berechnen für eine gegebene Lichtintensität, sind wir aber nicht, oder nur auf einem Umwege mit gewisser Wahrscheinlichkeit im Stande. Wir werden nämlich für terrestrische Objecte von messbarer Helligkeit die Gesichtswinkel bestimmen müssen, unter denen die Objecte eben sichtbar werden — und dann weiter die Gesichtswinkel bestimmen, unter welchen Objecte wahrgenommen werden können, wenn der Contrast gegen ihre Umgebung oder die Helligkeitsdifferenz des Objectes gegen seine Umgebung vermindert wird, womit ja die Wahrnehmbarkeit des Zerstreuungskreises abnehmen muss.

Es liegen eine Anzahl Bestimmungen über kleinste Gesichtswinkel, unter denen Objecte eben noch sichtbar waren, vor: Für einen Gauss'schen Heliotropen, welcher Sonnenlicht reflectirte (bei 3 Zoll Durchmesser in 213000 Pariser Fuss sichtbar, Humboldt, Kosmos III. p. 70) berechnet sich der Gesichtswinkel auf 0,43 Sekunden; für die Grenze der Sichtbarkeit eines weissen Quadrates auf schwarzem Grunde, direct von der Sonne beschienen, findet Plateau 12″, von diffusem Tageslicht beleuchtet 18″ (Poggendorff's Annalen Bd. 20, 1830, p. 328), Hueck für einen weissen Punkt auf schwarzem Felde 10″ (Müller's Archiv 1840, p. 86), Aubert für ein weisses Quadrat auf schwarzem Papier im diffusen Tageslichte 18″ (Physiol. der Netzhaut p. 197). Noch grösser müssen die Gesichtswinkel sein für schwarze Objecte auf weissem Grunde: Tobias Mayer fand für runde Punkte, mit schwarzer Tusche auf sehr weisses Papier gemalt, 30″ bis 36″ (Commentarii Societatis Goettingensis ad annum 1754, p. 100), Hueck 30″ (der l. c. angegebene Werth 20″ muss ein Druckfehler sein), Aubert 25″—29″.

In allen diesen Bestimmungen ist der Contrast des eben noch sichtbaren Objectes gegen seine Umgebung sehr bedeutend: ich habe nun Versuche über die Grenze der Sichtbarkeit bei Verminderung des Contrastes angestellt. Ich stellte ein weisses, bezw. ein schwarzes Quadrat von 10 Mm. Seite vor einer Maxwell'schen rotirenden Scheibe (s. § 25) auf, bei welcher eine schwarze Scheibe gegen eine weisse Scheibe verschoben und so eingestellt wird, dass n^0 Weiss und 360^0-n^0 Schwarz ein Grau bilden, dessen Helligkeit beliebig verändert und gemessen werden kann. Das Quadrat wurde aus gegebenen Entfernungen beobachtet und auf die rotirende Scheibe als Hintergrund projicirt. Zur Verkleinerung des Gesichtswinkels benutzte ich das Volkmann'sche Makroscop, welches in § 53 beschrieben ist. Das in den Versuchen angewendete weisse Papier ist 57 Mal heller als das schwarze Papier (s. § 25). Das Nähere über die Anstellung der Versuche ist in meiner Physiologie der Netzhaut p. 200 angegeben.

Folgende Resultate habe ich an zwei hellen Tagen, von denen der erste heller war als der zweite, für die kleinsten Gesichtswinkel, unter denen die Objecte eben noch sichtbar waren, erhalten.

Tabelle XXII[a].

Grund dunkler als das Object.	Weisses Object.		Grund heller als das Object.	Schwarzes Object.	
	I. Tag.	II. Tag.		I. Tag.	II. Tag.
57 Mal	15″	18″	57 Mal	25″	29″
17 -	32″	34″	43 -	35″	33″
10 -	34″	37″	29 -	35″	37″
7 -	36″	39″	15 -	35″	37″
3,8 -	39″	44″	8 -	37″	38″
2 -	46″	50″	5,66 -	38″	42″
			3,3 -	39″	45″

Wir sehen also sowohl für das weisse wie für das schwarze Object eine Zunahme des Gesichtswinkels erforderlich werden, wenn der Contrast gegen die Umgebung abnimmt — indess wenn wir die sehr grossen und die sehr geringen Contraste ausschliessen, so ist bei einer Differenz der Helligkeit des Objectes zur Umgebung von 43 bis zu 7 (in Tabelle XXII[a]) die Grösse des Gesichtswinkels einem sehr geringen Wechsel unterworfen. In den Beobachtungen des I. Tages beträgt der Gesichtswinkel 32″ bis 37″, in denen des II. Tages 33″ bis 39″. — Bei den angegebenen Helligkeitsdifferenzen des Objectes gegen den Grund ist wohl anzunehmen, dass der wahrnehmbare Theil der Zerstreuungskreise nur sehr klein, vielleicht verschwindend klein gewesen ist, und das sensible Netzhautbild dem Gesichtswinkel der Objecte fast genau entsprochen hat. Setzen wir diesen Gesichtswinkel im Mittel = 35″, so würde bei einer Entfernung des hinteren Knotenpunktes von der Netzhaut = 15 Mm. sich eine Grösse des Netzhautbildes = 0,0025 Mm. oder 2,5μ ergeben, also eine Grösse, welche ungefähr dem Durchmesser eines Zapfens in der *Fovea centralis* entspricht. (cf. Volkmann, Physiologische Untersuchungen 1863, p. 79. — Max Schultze, Archiv für mikroscop. Anatomie II. p. 225. — H. Müller, Würzburger Naturwissenschaftliche Zeitschrift II. p. 218. — Schwalbe, dieses Handbuch I. 1, p. 433.)

Ich habe diese wahrscheinlich geringste Grösse des wahrnehmbaren Netzhautbildes als physiologischen Punkt bezeichnet (Physiologie der Netzhaut p. 203). — Smith hatte dieselbe »empfindlichen Punkt« genannt (Smith-Kästner, Lehrbegriff der Optik 1755, p. 29) — und damit ausdrücken wollen, man brauche sich die empfindende Fläche der Netzhaut aus nicht kleineren Punkten oder Flächen, einem nicht feineren Mosaik zusammengesetzt zu denken. — Wir werden in § 53 sehen, dass wir uns die wahrnehmbare Ausdehnung des Netzhautbildes von Fixsternen, welche mit blossem Auge sichtbar sind, grösser zu denken haben.

Ich muss indess noch bemerken, dass die Verhältnisse der Beleuchtung im diffusen Tageslicht bei diesen Versuchen nicht die möglichst günstigen waren, da das Object etwa 3 Meter von dem Fenster entfernt aufgestellt werden musste. Dass aber die Helligkeit der Beleuchtung bei diesen Bestimmungen von grossem Einflusse ist, ergiebt sich ausser dem in § 25 Angeführten auch noch aus Versuchen, welche in gleicher Weise, wie die obigen, aber mit absichtlicher Beschränkung des diffusen Tageslichtes angestellt wurden.

Tabelle XXII^b.

Grund dunkler als das Object.	Weisses Object.	Grund heller als das Object.	Schwarzes Object.
57 Mal	49″	57 Mal	30″
17 -	56″	43 -	34″
10 -	63″	29 -	36″
7 -	65″	15 -	39″
3,8 -	65″	8 -	52″

Der Gesichtswinkel für das schwarze Quadrat hat sich wenig geändert, der für dass weisse aber bedeutend zugenommen. Den Grund für diese auffallende Erscheinung glaube ich in Volkmann's Beobachtungen zu finden, wonach die Irradiation des Schwarz auf weissem Grunde geringer ist, als die des Weiss auf schwarzem Grunde, weil das Weiss wegen seiner grösseren Lichtstärke mehr von dem lichtarmen schwarzen Grunde überstrahlt (annectirt) als das Schwarz, welches vielmehr von der Umgebung überstrahlt wird. (cf. Volkmann's Physiologische Untersuchungen 1863, p. 21—27, und meine Physiologie der Netzhaut p. 206 und 217.)

Die oben in diesem Paragraph gestellten Fragen würden wir dahin beantworten: die kleinsten eben noch wahrnehmbaren Netzhautbilder sind etwa von der Grösse des Querschnittes eines Zapfens der *Fovea centralis*; die Zapfen können daher als die Elemente des die räumliche Wahrnehmung vermittelnden Mechanismus angesehen werden. Wir werden in § 53 diesen Satz noch weiter zu prüfen haben.

§ 53. Die Wahrnehmung distincter Punkte. (Sehschärfe.) — Von besonderer, sowohl physiologischer als praktischer Wichtigkeit ist das Vermögen, Punkte, welche sich in gewisser Entfernung von einander auf der Netzhaut abbilden, getrennt von einander oder distinct wahrzunehmen. Denn da wir uns alle Lineamente und Formen der Objecte aus (physiologischen) Punkten zusammengesetzt vorzustellen haben, so wird die Genauigkeit oder Schärfe der Formwahrnehmung beruhen auf der Fähigkeit, Punkte von einander zu unterscheiden, oder Punkte als räumlich getrennt zu empfinden. Wenn nun auch über die Sichtbarkeit von Doppelpunkten und Doppellinien eine sehr erhebliche Anzahl von Beobachtungen vorliegt, so stossen wir doch auf sehr grosse Schwierigkeiten, wenn es sich um die Ermittelung der Distanzen handelt, welche die Punkte oder Linien im Netzhautbilde haben müssen, um unterschieden werden zu können.

Bezüglich der Angaben über die Unterscheidbarkeit von Sternen muss ich die immer wieder angeführte Angabe von Hooke (Smith-Kästner, Lehrbegriff der Optik 1755, p. 29 und 502) als im höchsten Grade zweifelhaft ausschliessen, dass ein Mensch Sterne, welche 60″ von einander entfernt sind, als zwei erkennen könne. Die Jupiterstrabanten werden nur ausnahmsweise mit blossem Auge erkannt; ein Breslauer Schuhmacher Schön erkannte sie, als der erste Trabant 2 Minuten, der dritte über 4 Minuten von dem Planeten entfernt war (Humboldt, Kosmos III. p. 112) — ε und 5 Lyrae, welche 3′ 27″ von einander entfernt sind, stehen an der Grenze der Unterscheidbarkeit. Humboldt (l. c. p. 66) giebt an:

»Galle glaubt bei sehr heiterer Luft ε und 5 Lyrae mit blossem Auge zu sondern«, und auch ich habe unter Controle des Herrn Professor Galle diese beiden Sterne gesondert erkannt und die Richtung ihrer Verbindungslinie richtig angegeben, ohne vorher etwas von ihrer Lage zu wissen. Man vergleiche übrigens Struve, Mensurae micrometricae 1837, p. 153, — Mädler, Wunderbau des Weltalls 1861, p. 518, — Harting, Das Mikroscop 1866, I. p. 68. — Während beim Sehen durch Telescope wenig geändert zu werden scheint, macht Harting nach seinen Untersuchungen die merkwürdige Angabe, dass beim Sehen durch die besten Mikroscope ein Verlust an Unterscheidbarkeit von fast 80% stattfände. (Poggendorff's Annalen 1861, Bd. 114, p. 91, — Harting, Das Mikroscop 1866, I. p. 72 und 336—341.)

Von terrestrischen Objecten sah Struve (Mensurae micrometricae p. 149 bis 153) weisse Scheiben auf schwarzem Grunde bei 51″ Distanz, Hueck (Müller's Archiv 1840, p. 87) schwarze Punkte bei 1′ 4″ Distanz; ich weisse Quadrate bei 55″, schwarze Quadrate bei 1′ 8″. Indess habe ich gefunden, dass derartige Bestimmungen keinen absoluten Werth haben, sondern zunächst abhängig sind von der Deutlichkeit, mit der die Objecte selbst wahrgenommen werden. Die Deutlichkeit der Objecte aber ist abhängig 1) von dem Gesichtswinkel, unter welchem sie gesehen werden, 2) von dem Contraste gegen die Umgebung, 3) von der absoluten Helligkeit.

Die folgende Tabelle XXIII. giebt eine Uebersicht über den Einfluss dieser Momente: im ersten Stabe sind die Gesichtswinkel für die Seite der weissen Quadrate verzeichnet, in den übrigen Stäben die Gesichtswinkel für die Distanzen, welche eben noch wahrgenommen werden konnten, und zwar unter I. nach Beobachtung an einem ungewöhnlich hellen Tage, unter II. an einem weniger hellen Tage — beide auf einem 57 Mal dunkleren Grunde, unter III. an demselben weniger hellen Tage an weissen Quadraten auf grauem Grunde, welcher ungefähr 2,5 Mal dunkler war, als das Weiss oder 23 Mal heller als der schwarze Grund (beim Vergleich mit der rotirenden Scheibe war das graue Papier = 140° Weiss + 215° Schwarz + 5° Roth).

Tabelle XXIII.

Gesichtswinkel der Quadrate.	Gesichtswinkel für die Distanzen.		
	I. sehr heller Tag.	II. weniger heller Tag.	III.
	Weiss auf Schwarz.	Weiss auf Schwarz.	Weiss auf Grau.
114″	29″	28″	34″
91″	46″	60″	68″
76″	60″	98″	92″
65″	72″	145″	140″
57″	97″	160″	210″
51″	107″	204″	270″
46″	110″	230″	—

Schwarze Quadrate auf weissem oder auf grauem Grunde erforderten im Ganzen noch grössere Distanzen, um unterschieden werden zu können.

Die einfachen Angaben, in welcher Entfernung von einander Punkte auf der Netzhaut abgebildet werden müssen, um unterschieden werden zu können, sind nach diesen Versuchen von geringem Werthe. Die Bestimmungen bei Anwendung von Liniendistanzen, Gittern und dergleichen haben auch sehr verschiedene Werthe für die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen ergeben. (Helmholtz, Physiologische Optik p. 218.) Ich führe diese Werthe hier nicht auf, da die ganze Frage seit Volkmann's Untersuchungen (Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik 1863 und 1864) sich wesentlich anders gestaltet hat.

Volkmann geht bei seinen Untersuchungen von folgendem Gedanken aus: die Objecte, deren kleinste wahrnehmbare Distanz man bestimmt, werden durch die Lichtzerstreuung (Irradiation) verbreitert, folglich die Distanz zwischen ihnen im Netzhautbilde verkleinert, etwa wie in Figur 73. Will man also die kleinste wahrnehmbare Distanz der Netzhautbilder bestimmen, so muss man erst die Grösse der Irradiation des Objectes feststellen und diese von der gefundenen Distanz der Objecte in Abzug bringen. Die Grösse der Irradiation von Linien kann man dadurch bestimmen, dass man die scheinbare Distanz zwischen den beiden Linien genau der scheinbaren Breite der Linien gleich zu machen sucht: die Grösse, um welche die wirkliche Breite der Linien von der im Versuche erhaltenen Breite der Distanz übertroffen wird, ist die Irradiationsgrösse. Volkmann setzt die wirkliche Breite der Linien $= B$, die im Versuche dieser Breite scheinbar gleichgemachte Distanz $= D$; D wird immer grösser gefunden als B; die Differenz setzt Volkmann $= Z$; es ist dann $B + Z = D - Z$,

woraus $$Z = \frac{D - B}{2}.$$

Fig. 73.

B verbreitert sich je nach beiden Seiten um Z, nach innen um $\frac{1}{2}Z$; entsprechend wird D von beiden Seiten um $\frac{1}{2}Z$, also zusammen auch um Z verschmälert: Z ist also die Irradiationsgrösse. In einem zweiten Versuche bestimmt Volkmann unter sonst gleichen Umständen die kleinste Distanz, welche zwischen den beiden Linien noch eben wahrgenommen werden kann, sie sei $= D'$. Unter der Annahme, dass in dem zweiten Versuche die Verbreiterung B der Linie dieselbe geblieben ist, entspricht die Grösse D' nicht der Distanz der Netzhautbilder, sondern offenbar der Grösse $D' - Z$, d. h. der Distanz der Netzhautbilder mit Ausschluss des Irradiationseinflusses; $D' - Z$ sei $= D''$. Bezeichnen wir die Netzhautbilder entsprechend mit β, δ, δ', δ'' und ζ, so ist

$$\zeta = \frac{\delta - \beta}{2} \text{ und } \delta' - \zeta = \delta''.$$

Volkmann sagt daher mit Recht: »Alle bisher gemachten Angaben über die Grösse der kleinsten noch wahrnehmbaren Netzhautbilder sind sämmtlich zu gross, weil die Rechnungen die Irradiation unberücksichtigt lassen.«

Volkmann hat zu seinen Versuchen theils dünne Silberdrähte von 0,05 Mm. Dicke, welche mittelst eines Schraubenmikrometers verstellbar sind und entweder bei auffallendem Lichte als helle Linien auf dunkeln Grund projicirt oder

als dunkle Linien auf den hellen Himmel projicirt werden, — theils weisse oder schwarze Papierstreifen auf schwarzem oder weissem Grunde von 1 Mm. Breite benutzt. Ich habe mich bei der Wiederholung der Volkmann'schen Versuche verhältnissmässig grosser Objecte, Papierstreifen von 2 Mm. Breite und 50 Mm. Länge bedient, welche gegen einander verschoben und deren wirkliche Distanz dann leicht sehr genau gemessen werden kann. VOLKMANN hat sich in einigen seiner Versuchsreihen, ich habe mich durchgängig einer von VOLKMANN angegebenen Vorrichtung, des schon oben erwähnten Makroscops bedient. Dasselbe besteht aus einer Glaslinse von etwa 15 Mm. bis 60 Mm. Focus (Sammellinsen der Mikroscopoculare sind dazu sehr geeignet) in einer innen geschwärzten Röhre, welche verlängert und verkürzt werden kann und auf einem Stativ befestigt ist. Von dem Object O wird dann ein Luftbild o in einer Entfernung hinter der Linse L entworfen, welche durch den Focus der Linse und die Entfernung des Objectes von der Linse bestimmt ist. In a befindet sich das Auge des Beobachters und sieht das Luftbild aus der willkürlich veränderlichen Sehweite S. Die Grösse des Bildes o findet man, wenn E die Entfernung des Objectes O von der Linse, e die Entfernung des Luftbildes von der Linse bedeutet $o = \frac{e \cdot O}{E}$, der Gesichtswinkel für o ergiebt sich aus tang $x = \frac{o}{S}$; ist E in den Versuchen sehr viel grösser, als die Brennweite der Linse, so kann man die Brennweite ohne merklichen Fehler für e substituiren, so dass tang $x = \frac{O \cdot F}{E \cdot S}$.

Meine Versuchsresultate stimmen sehr gut mit denen von VOLKMANN; ich führe eine meiner Versuchsreihen in der folgenden Tabelle an, indem ich die Gesichtswinkel entsprechend den Netzhautbildern β, δ, δ' u. s. w. mit b, d, d', d'', z bezeichne.

Tabelle XXIV.

Weisse Linien auf Schwarz.					Schwarze Linien auf Weiss.			
b	d'	d	z	$d'-z$	d'	d	z	$d'-z$
45″	67″	146″	50″	17″	45″	112″	34″	11″
36	72	153	58	14	48	108	36	12
30	67	150	60	7	60	105	38	22
26	72	143	59	13	64	104	39	25
22,5	75	140	59	16	72	106	42	30
20	80	140	60	20	80	110	45	35
18	81	148	65	16	95	108	45	40
15	80	148	66	14				
13	88	146	66	22.				
11,5	96	(165)	77	19				
10	100	153	72	28				

b = Breite der Linien, d = die der Breite b gleichgemachte Distanz, d' kleinste Distanz, $z = \frac{d-b}{2}$ = Irradiationsgrösse $d'' = d' - z$. Breite der Linien = 2 Mm., Länge = 50 Mm.

Aus diesen, wie aus VOLKMANN's und meinen übrigen Zahlen ergiebt sich das auffallende Resultat, dass d sich fast gar nicht ändert, obgleich b immerfort

abnimmt, d. h. das wahrnehmbare Netzhautbild der Linien erscheint unabhängig von dem Gesichtswinkel derselben immer gleich breit, nämlich bei den weissen Linien im Mittel etwa 145", bei den schwarzen Linien etwa 108" breit. Da b immer mehr abnimmt, so muss z entsprechend zunehmen, was VOLKMANN zu dem Satze veranlasst: »die Grösse der Irradiation und des Netzhautbildes verändern sich in entgegengesetzter Richtung.«

Wenn nun eine solche progressive Veränderung der Irradiation in Bezug auf die Breite der Linien sich zeigt, so liegt der Schluss nahe, dass die Verhältnisse der Irradiation auch andere sein werden, je nachdem die Distanz der Linien grösser oder kleiner ist, was ja bei den Bestimmungen von d und d' statt hat. Wenn aber die Irradiationsbedingungen andere sind bei der Beobachtung von d als bei der von d', so darf das bei der Beobachtung von d ermittelte z nicht auf die d'-Beobachtungen übertragen werden. Damit werden aber die Schlüsse VOLKMANN's auf die wirkliche Grösse der Netzhautbilder illusorisch. Dass diese für $d' - z = d''$ gewonnenen Zahlen nicht richtig sind, wird schon aus den sehr grossen Schwankungen, welche sowohl VOLKMANN als ich (s. Tabelle XXIV. die $d' - z$-Werthe) gefunden haben, ersichtlich. Denn wenn die berechneten Grössen statt der zu erwartenden Gleichheit Schwankungen um das 3- und 4fache zeigen, ja sogar in einzelnen Versuchen z grösser als d' gefunden und damit das wirkliche Netzhautbild d'' negativ wird, so muss man schliessen, dass ein nicht in Rechnung gebrachtes Moment mit im Spiele sei.

Dieses Moment liegt in den durch die Irradiation selbst hervorgebrachten Contrastverhältnissen oder Helligkeitsdifferenzen. Ich habe diese Verhältnisse in meiner Physiologie der Netzhaut p. 216—225 erörtert, meistens auf Grund von Beobachtungen über Irradiation, welche wir VOLKMANN verdanken. Die wesentlichen, hierbei in Betracht kommenden Umstände glaube ich darin zu finden, 1) dass von der Irradiationszone der Objecte mehr oder weniger dem Zwischenraume hinzugefügt (annectirt, VOLKMANN) wird, je nachdem die Helligkeit einer Irradiationszone mehr der Helligkeit des Objectes oder mehr der Helligkeit des Zwischenraumes gleicht; 2) dass bei verminderter Helligkeitsdifferenz zwischen Object und Grund der Gesichtswinkel für das Object sowohl, wie für den Zwischenraum der Objecte grösser werden muss, wenn noch eine Wahrnehmung des Objectes, bezw. des Zwischenraumes möglich sein soll; darauf beruht die Zunahme der d'-Werthe bei Abnahme von b.

Endlich finde ich in Uebereinstimmung mit dem Gleichbleiben der d-Werthe, dass schwarze Linien von 1,5 Mm., 1 Mm., 0,5 Mm., 0,25 Mm. Breite und etwa 30 Mm. Länge auf weissem Grunde in einer Entfernung von 3—4 Meter sämmtlich gleich breit, aber von sehr verschiedener Helligkeit erscheinen und muss daraus schliessen, dass die bei VOLKMANN (Physiol. Untersuchungen 1863, p. 95—98) angeführten Unterscheidungen von 1 und 1,1 Mm. breiten Linien bei makroscopischer Verkleinerung nicht auf Wahrnehmung der verschiedenen Breiten, sondern auf Wahrnehmung verschiedener Helligkeiten der Zerstreuungsbilder beruhen.

Wenn also einerseits VOLKMANN's Satz, dass die bisher gefundenen Distanzen der Netzhautbilder wegen Vernachlässigung der Irradiation zu gross angenommen worden sind, gewiss richtig ist, so muss ich anderseits auch behaupten, dass aus

Volkmann's und meinen Beobachtungen eben so wenig auf die Grösse der kleinsten wahrnehmbaren Netzhautdistanzen geschlossen werden kann, dass namentlich aus denselben nicht hervorgeht, dass die empfindenden Elemente der Netzhaut beträchtlich kleiner sein müssen als die Zapfen der *Fovea centralis*.

Eine in § 103 meiner Physiologie der Netzhaut angestellte Berechnung der Irradiationsgrösse, welche von der Betrachtung ausgeht, dass 3 distincte Empfindungen stattfinden auf einem Raume, welcher bei Berücksichtigung der Irradiation gemessen wird durch $d' + 2b + z$, so dass die Grösse für den zu einer distincten Empfindung genügenden Raum sich berechnen würde $= \frac{d' + 2b + z}{3}$ oder da $z = \frac{d-b}{2}$ ist, $= \frac{d'}{3} + \frac{b}{2} + \frac{d}{6}$, ergiebt für die kleinsten Netzhautbilder meiner Beobachtungen 52″ bis 68″, nämlich

für die schwarzen Linien auf weissem Grunde 52″ bis 59″
- - weissen - - schwarzem - 59″ - 68″
- - grauen - - schwarzem - 64″ - 68″

Die von Volkmann an sich selbst beobachteten Werthe ergeben 67″, die an E. Volkmann aber nur 33″. — Fehlerfrei ist diese Berechnung indess auch nicht, und die erhaltenen Werthe wohl etwas zu gross.

Helmholtz (Physiol. Optik p. 841) erwähnt Versuche von Dr. Hirschmann mit Systemen paralleler Drähte (wahrscheinlich in Helmholtz' Institut angestellt, aber nicht publicirt), welcher »ebenfalls bis zu Werthen von 50 Sekunden Gesichtswinkel gekommen sei«.

Wir sind demnach nicht im Stande, genauere Angaben über die kleinsten Distanzen der Netzhautbilder zu machen, welche zur distincten Wahrnehmung erfordert werden. Für die Frage, ob die Zapfen als die empfindenden Elemente der Netzhaut angesehen werden können, hat indess diese Bestimmung sehr an Interesse verloren, seitdem Hensen (Virchow's Archiv für pathologische Anatomie 1865, Bd. 34, p. 401 und 1867, Bd. 39, p. 475) die Hypothese aufgestellt und begründet hat, dass nicht in den Zapfenkörpern, sondern in den Zapfenstäbchen oder Zapfenspitzen die Gesichtsempfindungen angeregt werden. Die Zapfenspitzen messen aber nach Max Schultze höchstens 0,0006 Mm. oder 0,6 μ, was einem Gesichtswinkel von etwa 10 Sekunden entsprechen würde. (Archiv f. mikroscopische Anatomie 1866, II. p. 231).

Da nun die Zapfenspitzen nicht unmittelbar an einander grenzen, sondern Lücken zwischen sich lassen (s. Schultze, l. c. Figur 1 auf Tafel XII.), so hat Hensen zur Stützung seiner von Volkmann (Dubois und Reichert's Archiv 1866, p. 649) angegriffenen Hypothese weiter den Nachweis geführt (l. c. Bd. 39, p. 475), »dass das Gesichtsfeld in der *Fovea centralis* nachweisbar lückenhaft ist, dass wir aber die beim Sehen feinster Punktreihen vorhandenen Lücken wirklich zu Linien ergänzen.« — Aus dieser Lückenhaftigkeit der *Fovea centralis* erklärt Hensen auch die in § 27 besprochene Wahrnehmung lichtschwacher Sterne mittelst indirecten Sehens. Dass wir nur unter besonderen Umständen diese Lücken bemerken können, für gewöhnlich aber übersehen, würde sich genügend aus den stets vorhandenen unwillkürlichen kleinen Verschiebungen des Auges erklären.

Theils auf die Lücken, theils auf die eigenthümliche Anordnung der Zapfenspitzen führt nun Hensen eine schon von Purkinje gemachte Beobachtung, die »Verwandlung paralleler gerader Linien in wellenförmige« (Purkinje, Beobachtungen I. p. 122) zurück. Betrachtet man nämlich ein Gitter von 10 oder 12 schwarzen Parallellinien auf weissem Grunde, so dass also weisse und schwarze Linien von etwa 0,5 Mm. Breite abwechseln aus 1 bis 1,5 Meter Entfernung, oder noch besser, blickt man nach Hensen's Angabe durch parallele Liniensysteme, welche auf schwarz gefirnisstem Glase in 0,7 Mm. entfernten Zwischenräumen in einer Breite von etwa 0,04 Mm. gezogen sind aus etwa 0,5 Meter Entfernung, auf den hellen Himmel, so werden die Linien sehr leicht wellig und erscheinen bei feineren Zwischenräumen sogar als Schräglinien. (cf. Hensen 1867, l. c. Fig. 1 und Helmholtz, Physiol. Optik p. 207, Fig. 217.)

Ueber die in der ophthalmologischen Praxis gebräuchlichen Objecte und Methoden zur Bestimmung der individuellen Sehschärfe haben Snellen und Landolt in diesem Handbuche III. 1, p. 1—19, Cap. Eidoptometrie, schon berichtet.

§ 54. Wahrnehmung distincter Punkte beim indirecten Sehen. — Die Versuche, welche wir im vorigen Paragraph anführten, werden so angestellt, dass das Object möglichst scharf fixirt wird, dass also das Netzhautbild in die *Fovea centralis* fällt. Wenn das Netzhautbild beim indirecten Sehen auf andere Theile der Netzhaut, welche mehr peripherisch nach dem Aequator hin gelegen sind, fällt, so wird es im Ganzen um so weniger deutlich wahrgenommen, je weiter es von der *Fovea centralis* entfernt ist. Gleichwohl ist, wie schon Purkinje (Beobachtungen II. p. 28) nachgewiesen hat, das indirecte Sehen von grosser Wichtigkeit für unsere Orientirung im Raume: verdeckt man seine Augen bis auf ein kleines Loch im Centrum vollständig, so ist man nach einigen Bewegungen bald nicht mehr im Stande, sich in seinem eigenen Zimmer zurechtzufinden. Man bemerkt, wenn man darauf Acht giebt, auch sehr bald beim Gehen, Tanzen u. s. w., wie man sehr viele Objecte überhaupt nur indirect sieht, und Kranke, welche an grösseren Beschränkungen des Gesichtsfeldes von der Peripherie her leiden, gehen auf der Strasse sehr unsicher und stolpern und fallen leicht.

Dass die Gesichtsobjecte beim indirecten Sehen viel undeutlicher erscheinen, als wenn man sie direct sieht, oder sie fixirt, hat seinen Grund nicht in den Brechungsverhältnissen der Augenmedien, denn die Objecte erscheinen keineswegs mit Zerstreuungskreisen, sondern in ganz anderer Weise undeutlich: zwei schwarze Punkte von 1 Mm. Durchmesser und 10 Mm. Entfernung von einander erscheinen keineswegs immer matter und grauer, je weiter man sie von dem fixirten Punkte nach der Peripherie hin entfernt, sondern sie bleiben vollkommen schwarz, aber man kann nicht mehr sagen, ob man einen oder zwei Punkte sieht. Es folgt daraus, dass die Ursache des unvollkommenen Wahrnehmens beim indirecten Sehen in der Netzhaut liegen muss. Siehe meine Physiologie der Netzhaut p. 249. Dies wird insbesondere bestätigt durch die Untersuchungen von Landolt und Nuël über die Lage des Knotenpunktes für excentrisch in das Auge fallende Lichtstrahlen. (Onderzoekingen in het Physiol. Laborat. te Utrecht 1874. Dreede Reeks III. 1, p. 1.)

Besondere Versuche über die Abnahme der Deutlichkeit beim indirecten Sehen sind schon von Purkinje (Beobachtungen II. p. 4, Figur 1), von Hueck

(Müller's Archiv 1840, p. 93), von Volkmann (Artikel Sehen im Handwörterbuch der Physiologie III. 1, 1846, p. 334), endlich, da Hueck's und Volkmann's Angaben sehr bedeutend von einander differiren (s. Physiol. d. Netzhaut p. 237), von Förster und mir (Archiv für Ophthalmologie 1857, III. 2, p. 1) gemacht worden.

Man verfährt bei diesen Bestimmungen entweder so, dass man am Perimeter (s. § 42) einen Punkt fixirt und das zu beobachtende Object an dem Gradbogen so weit nach der Peripherie von dem fixirten Punkte fortschiebt, bis es undeutlich wird, bezw. in umgekehrter Richtung, bis es deutlich wird — oder dass man, um alle Bewegungen des Auges auszuschliessen, nach Volkmann's (l. c. p. 335) Vorschlag eine Anzahl von Objecten mittelst des momentanen elektrischen Funkens beleuchtet, und aufmerkt, wie weit nach der Peripherie hin man im Stande ist, die Objecte, z. B. Zahlen oder Buchstaben, deutlich zu erkennen. Beide Methoden sind von Förster und mir angewendet worden.

Bei der Methode mit momentaner Beleuchtung dienten als zu erkennende Objecte Ziffern und Buchstaben, welche in gleich grossen Zwischenräumen auf Papierbogen von 2 Fuss Breite und 5 Fuss Länge gedruckt sind, und so aufgerollt werden, dass etwa 2 Fuss im Quadrat sichtbar bleiben. Der Beobachter sieht dann nur während des Ueberspringens des Funkens die Ziffern und Buchstaben, ohne vorher zu wissen, was für Ziffern eingestellt sind, und giebt sofort nachdem der Funken übergesprungen ist, die Ziffern an, welche er erkannt hat, was dann sogleich controlirt und notirt wird. Es ist zweckmässig, durch eine geschwärzte Röhre auf festem Statif zu blicken, theils um dem Auge immer denselben Ort anzuweisen, theils um den Funken abzublenden; ausserdem darf man das Zimmer nicht total verfinstern, sondern nur so weit, dass die Objecte noch als matte Punkte erscheinen, damit sich das Auge für die Entfernung der Objecte richtig accommodiren kann.

Die zweite Methode besteht in der Untersuchung mittelst eines Perimeters, in dessen Läufern man eine Karte von weissem Papier, auf welcher zwei schwarze Punkte oder Quadrate in bestimmter Entfernung von einander angebracht sind, verschiebt bei fester Fixation. Es ist, wie auch Landolt und Ito (dieses Handbuch III. 1, p. 64) hervorheben, immer ein gewisses Grenzgebiet, wo man in Zweifel ist, ob man einen Punkt oder zwei Punkte sieht. — Störungen in der Genauigkeit der Bestimmung werden ferner, wie auch Landolt und Ito (l. c.) bestätigen, dadurch hervorgebracht, dass auf der Netzhaut ausser dem Mariotte'schen blinden Flecke noch andere kleinere blinde Stellen vorkommen, wahrscheinlich durch die Netzhautgefässe bedingt.

Förster und ich haben gefunden, 1) dass die Distanz der Punkte von einander massgebend ist für die Anzahl der Grade, um welche das Object von der Gesichtslinie entfernt werden kann, ohne dass die Punkte ihre Unterscheidbarkeit verlieren; 2) dass die Grösse der Punkte von Einfluss ist auf den Winkel, unter welchem die Punkte aufhören, distinct zu erscheinen; 3) dass die Fähigkeit, zwei Punkte distinct zu sehen, in den verschiedenen Meridianen der Netzhaut sehr ungleich abnimmt und für die einzelnen Augen verschieden ist. Dies ergiebt sich aus Figur 74, in welcher die 16 Radien von dem fixirten Punkte aus bis zu den Grenzen gezogen sind, wo die Unterscheidbarkeit zweier schwarzer Punkte von 2,5 Mm. Durchmesser und 9,5 Mm. Distanz ihrer inneren Ränder eben aufhörte. Die punktirten Grenzlinien beziehen

ich auf Förster's, die ausgezogenen Grenzlinien auf meine Augen; die Rich-
ngen beziehen sich auf den Raum, sind also für die Netzhaut umzukehren, die
adiivectoren sind auf ein Fünftel reducirt. — Landolt und Ito (dieses Hand-

Fig. 74.

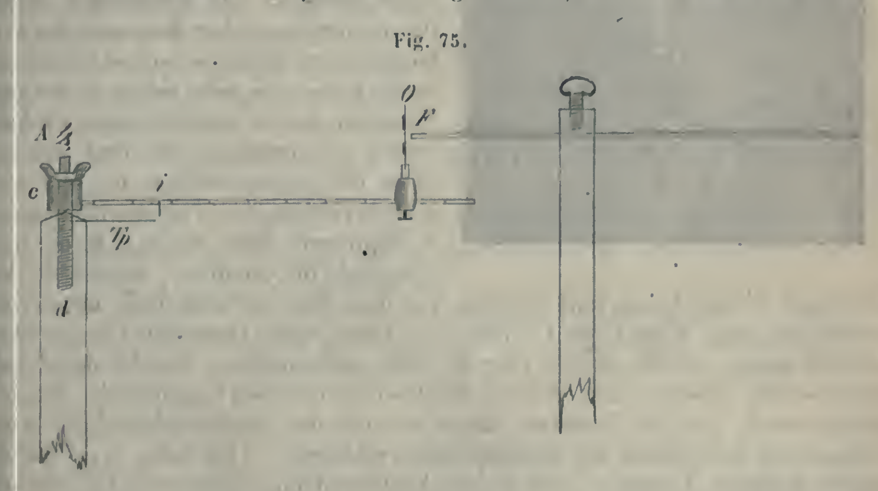


uch III. 1, p. 65) haben ganz ähnliche Resultate bei ihren Messungen am Peri-
neter erhalten.

Da Förster und mir bei den Versuchen mit momentaner Beleuchtung auf-
efallen war, dass die Entfernung der Objecte vom Auge Verände-
ungen der Grenzen für die Wahrnehmbarkeit auf der Peripherie
er Netzhaut bedingte, und zwar, dass bei gleichem Gesichtswinkel für die
bjecte kleine Ziffern und Buchstaben weiterhin peripherisch erkannt werden
onnten, als grosse Ziffern und Buchstaben, so habe ich (Moleschott's Unter-
uchungen IV. p. 16, 1857) besondere Versuche über dieses auffallende Verhalten
ngestellt und die Thatsache genauer bestätigt.

Zur Untersuchung dient der perimetrische Apparat Figur 75, welcher aus
iner etwas über 1 Meter langen Stahlstange besteht, welche mittelst der Hülse c

Fig. 75.



m die verticale Axe d gedreht werden kann; etwas über d befindet sich das
uge des Beobachters A und fixirt den näher oder ferner stellbaren Punkt F. In
estimmter, gemessener Entfernung werden Objecte O in dem Schlitze des Läufers
stgesteckt und durch Drehung der Stahlstange um d allmälig von F aus nach

der Peripherie hin bewegt, bis sie aufhören, distinct gesehen zu werden. A Objecte dienen schwarze Quadrate, deren Entfernung von einander gleich d Seite des Quadrates ist, auf weissem Papier, und zwar Quadrate von 20 Mm 8 Mm. und 4 Mm. Seite, welche also in einer Entfernung von bezw. 1000 Mm 400 Mm. und 200 Mm. denselben Gesichtswinkel von 1° 8′ geben. Dem en sprechend ist auch die Grösse des weissen Papiers.

Für den horizontalen Meridian der Netzhaut haben nun die Versuche ergebe dass der Winkel, innerhalb dessen die Quadrate distinct gesehen werden (d Raumwinkel), im Mittel von 4 Beobachtungsreihen beträgt

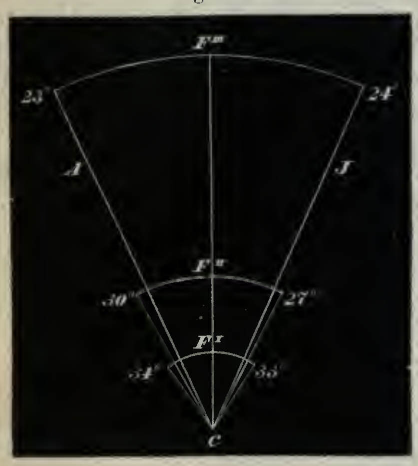
für die Quadrate von 20 Mm. in 1000 Mm. Entfernung 39°
\- - - 8 - - 400 - - 54°
\- - - 4 - - 200 - - 67°

Hier ist der Gesichtswinkel für die Quadrate = 1° 8′; bei einem Gesichtswink für die Quadrate von 0° 34′ fanden sich Raumwinkel

für die Quadrate von 8 Mm. in 800 Mm. Entfernung 35°
\- - - 4 - - 400 - - 43°

Figur 76 zeigt die Differenzen der Raumwinkel für die verschiedenen Ent fernungen nach meiner dritten Beobachtungsreihe, indem F^{I}, F^{II}, F^{III} di fixirten Punkte bedeuten, die Bogen de Raumwinkeln für die äussere und inne Seite des horizontalen Meridians (auf de Raum bezogen) entsprechen. Weitere be stätigende Beobachtungen finden sich l. c und Physiol. der Netzhaut p. 243.

Fig. 76.



Zur Erklärung dieser Thatsache würd man zunächst daran denken, dass di Accommodation der brechenden Medie für die peripherischen Regionen der Netz haut eine unvollkommenere sei beim Sehe in die Ferne, als beim Sehen in die Nähe Versuche, die ich hierüber angestellt habe haben ein negatives Resultat ergeben denn die Accommodation für die meh peripherischen Theile ist überhaupt so un vollkommen, dass, wenn z. B. die Rich tungslinie für Quadrate, welche 10 Mm Seite und Distanz haben und 200 Mm. von dem Auge entfernt sind, mit der Ge sichtslinie einen Winkel von 15° bildet, es kaum einen Unterschied in der Deut lichkeit macht, ob ich auf 200 oder 600 Mm. accommodire; erst bei der Accom modation für grössere Ferne werden die Quadrate merklich undeutlicher. Ebenso wenig lassen sich die Resultate durch die mit der Accommodation des Auge verbundene Verrückung des Knotenpunktes erklären. — Ich habe (l. c.) die An nahme gemacht, dass durch eine mit der Accommodation verbundene Verschiebun der Chorioidea und damit Hand in Hand gehende Verschiebung der Stäb chen- und Zapfenschicht der Netzhaut günstigere Lagerung de Stäbchen und Zapfen für die peripherischen Richtungslinien be wirkt würde. Seitdem ist durch Hensen und Völkers (Mechanismus de

ccommodation 1868, p. 27) eine Verschiebung der Chorioidea und mit ihr der etzhaut bei der Accommodation für die Nähe direct nachgewiesen worden, und iese wird um so mehr für unsere Frage in Betracht kommen, wenn es nach ensen's Hypothese die Zapfenspitzen sind, in denen die Gesichtsempfindung anregt wird. (cf. § 53.) Ich bin indess ausser Stande, weitere Beobachtungen ir meine Hypothese beibringen zu können.

§ 55. Die Empfindungskreise der Netzhaut. — Ernst Heinrich Veber bezeichnet die Bezirke auf der Haut und Netzhaut, innerhalb welcher eine istincte räumliche Empfindung nicht mehr stattfinden kann, als Empfindungsreise. (Artikel Tastsinn in Handwörterbuch der Physiologie 1846, III. 2, . 528 und Leipziger Berichte 1852, p. 103.) Die für das directe und das inirecte Sehen gefundenen Distanzen der Netzhautbilder, innerhalb welcher Punkte icht mehr unterschieden werden können, würden also als Durchmesser der mpfindungskreise anzusehen sein, und wir können sagen, dass die Empfindungsreise der Netzhaut in der *Fovea centralis* am kleinsten sind, nach der Peripherie er Netzhaut hin von da ab an Grösse allmälig immer mehr zunehmen. Ein hnliches Verhalten finden wir auf der Haut, wo die Empfindungskreise z. B. an en Fingerspitzen sehr klein sind, nach der Hand und dem Arme hin aber allälig an Grösse zunehmen.

Die Einrichtung, dass wir an einer beschränkten Stelle der Netzhaut die leinsten Empfindungskreise haben, mit dieser Stelle also die genauesten und härfsten Wahrnehmungen über die Form der Objecte machen können, ist von rosser Wichtigkeit für die Bewegungen unserer Augen und für die Orientirung n Raume. Wie wir die Fingerspitzen zur Betastung der Objecte in der Absicht, ns über ihre Form genauer zu unterrichten, benutzen, so betasten wir gewisserassen auch mit unserer *Fovea centralis* Stellen des Raumes, über deren Einzeleiten wir uns in räumlicher Beziehung unterrichten wollen — d. h. wir richten nsere Augen so, dass das Bild einer solchen Stelle auf die Centralgrube fällt. ätten wir eine Anzahl derartiger Foveae, so würden wir bald diese, bald jene ovea benutzen können, und wir müssten dann auf irgend eine Weise erfahren önnen, welche von diesen Foveae wir benutzen, um Erfahrungen über die iumliche Anordnung der Objecte zu gewinnen. Da für jede Netzhaut nur eine nzige Centralgrube vorhanden ist, so benutzen wir immer nur diese, und beegen oder richten unsere Augen immer der Art, dass das Bild der Objecte, über elche wir uns genauer unterrichten wollen, auf die *Fovea centralis* fällt. Es eruht also auf dieser Anordnung der empfindenden Elemente der Netzhaut die igenschaft, dass wir Punkte der Objecte fixiren, die Gesichtslinien auf dieelben richten, um ihr Netzhautbild auf dem am feinsten empfindenden Theile er Netzhaut aufzufangen.

Dadurch wird die *Fovea centralis* der physiologische Mittelpunkt oder entralpunkt der Netzhaut, und damit hängt es denn auch offenbar zusammen, ass wir unsere Netzhaut, wo sie auch immer durch einen Reiz getroffen werden ag, sofort so bewegen, dass der Reiz die Centralgrube treffen muss. Wenn wir uf unserer ganzen Netzhaut gleichmässig genaue Raumempfindung oder überall leich grosse Empfindungskreise hätten, so läge kein Grund vor, die Augen nach iesem Princip zu bewegen. Es kann dabei allerdings auffallend erscheinen,

dass wir unsere Augen mit so grosser Präcision auf die Stelle richten, welche w deutlich sehen wollen, da ja die Grösse der intendirten Bewegung mit niel grösserer Genauigkeit bestimmt werden kann, als die Grösse der Empfindungs kreise auf den peripherischen Regionen der Netzhaut zulässt. Es scheint abe nach einigen von mir angestellten Versuchen (Physiologie der Netzhaut p. 26 bis 264), dass man über die Lage eines indirect gesehenen Punktes mindesten so genau orientirt ist, als man nach der Grösse der Empfindungskreise erwarte kann. (cf. Aubert und Kammler in Moleschott's Untersuchungen 1858, V. p. 175 welche ähnliche Verhältnisse für die Präcision der Handbewegungen constati haben.) Der Zwang, unter welchem diese Classe der Augenbewegungen steh tritt besonders auffallend hervor bei den ersten Bemühungen, die Aufmerksam keit den indirect gesehenen Objecten zuzuwenden, ohne den Fixationspunkt z verändern.

Die Empfindungskreise sind ferner von Bedeutung für die Grössenanschauung wie Volkmann (Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes 1836, p. 51 un Physiologische Untersuchungen 1863, p. 141) und E. H. Weber (Handwörterbuc der Physiologie 1846, III. 2, p. 528) hervorgehoben haben. Nach Volkmann is »die Grössenanschauung eine Function der Zahl der erregten Nervenfasern«, wäh rend sich Weber etwas reservirter dahin ausspricht: »dass die Zahl der auf eine gegebenen Fläche, z. B. einem Quadratmillimeter endenden Nervenfasern eine Einfluss hat auf den Maassstab, womit wir den erfüllten Raum messen«. Für di Haut lässt sich der Nachweis direct führen: setzt man zwei 20 Mm. von einande entfernte Zirkelspitzen auf die Spitzen des dritten und vierten Fingers auf un bewegt die Zirkelspitzen allmälig über die Hohlhand nach dem Vorderarm, s hat man ganz deutlich die Empfindung, als ob die beiden Zirkelspitzen sich ein ander näherten und in der Gegend des Handgelenks in eine verschmelzen (E. H. Weber, Ueber den Raumsinn in Berichte über die Verhandlungen de Akademie in Leipzig 1852, p. 94.) Wenn Hering (Beiträge zur Physiologie 1861 I. p. 21) dagegen geltend macht, »dass uns dann eine Zirkelspitzenentfernun von einer Elle (600 Mm.) auf der Rückenhaut so gross erscheinen müsse, wi eine Zirkelspitzenentfernung von $^1/_2$ Zoll (10 Mm.) auf der Zungenspitzenhaut«, s übersieht Hering, dass wir eine grosse Reihe von Erfahrungen über die Grössen verhältnisse unserer Körpertheile zu einander in uns aufgespeichert haben, di wir eben so gut zur Beurtheilung von Dimensionen benutzen, wie unsere directe Empfindungen. Die Basis für unsere Grössenanschauungen und die Erfahrunge darüber werden aber doch immer die Empfindungskreise bilden müssen. — Wi reduciren nämlich, wie schon Weber (Handwörterbuch p. 529) angegeben hat das, was wir wahrnehmen, auf den Maassstab, welcher der feinste ist, benutze also von der Haut die Fingerspitzen, von der Netzhaut die *Fovea centralis* zu Erkennung der Grösse und richten nach diesen Empfindungen unsern Grössen maassstab ein. Ich habe schon früher (Physiologie der Netzhaut p. 252) hervor gehoben, dass wir indirect gesehene Objecte in Bezug auf ihre Grösse unbeur theilt zu lassen gewohnt sind, und wenn wir unsere Aufmerksamkeit auf di indirect gesehenen Objecte richten, die Verkleinerung derselben geringer ist, al wir nach der Grössenzunahme der Empfindungskreise nach der Peripherie hi erwarten sollten. Indess giebt Wittich (Archiv f. Ophthalm. IX. 3, 1863, p. 10 an, »dass, je weiter eine Karte von schwarzem Papier, auf welchem eine etw

2 Mm. dicke Linie gezogen ist, von der *Visio directa* entfernt wird, um so mehr Karte und Linie sich zu verkürzen scheinen und dass eine gleich breite Linie nach der Peripherie der Netzhaut hin sich zuzuspitzen scheine«. Mir selbst hat dieser Versuch nebst ähnlichen Versuchen kein recht überzeugendes Resultat geliefert, wenigstens nicht in dem Grade überzeugend, wie der Weber'sche analoge Versuch für die Haut. — Immerhin werden wir sagen müssen: dass, wenn die Empfindungskreise nicht der Maassstab sind, womit wir den erfüllten Raum und die Objecte messen, wir überhaupt in unsern Empfindungsorganen keinen Maassstab für die Grösse anzugeben im Stande sind.

Nach dem, was in § 53 über die kleinsten wahrnehmbaren Distanzen besprochen worden ist, werden wir den Durchmesser eines Empfindungskreises in der *Fovea centralis* etwa = 50 Sekunden oder = 3,5 μ, vielleicht auch noch etwas kleiner zu setzen haben, also etwa gleich dem Durchmesser eines Zapfenkörpers: es würde dann ein einziger Zapfenkörper genügen, um die Empfindungen seiner Nachbarn als distincte Wahrnehmungen zu unserem Bewusstsein gelangen zu lassen; für die übrige Netzhaut dagegen würde eine grössere Anzahl von Zapfen oder Stäbchen zur Bildung eines Empfindungskreises verwendet sein, wie WEBER auch für die Empfindungskreise der Haut angenommen hat. (Berichte 1853, p. 108.) Durch diese Einrichtung wird es erklärlich, dass jeder kleinste Punkt, jeder physiologische Punkt (§ 52), welcher isolirt afficirt wird, eine Empfindung vermittelt, dass aber für eine distincte Empfindung sowohl auf der Haut als auf der Peripherie der Netzhaut eine Anzahl von empfindenden (physiologischen) Punkten zwischen den Grenzpunkten eines Empfindungskreises gelegen sein muss. Ein zur Raumempfindung möglichst fein construirtes Organ würde nun offenbar so eingerichtet sein müssen, dass jedes empfindende Element zugleich genügte, um seine Empfindung isolirt von den nächstbenachbarten Elementen zum Bewusstsein zu bringen, mithin das, was wir physiologischen Punkt genannt haben, zugleich die Dignität eines Empfindungskreises hätte. Es scheint in der That, dass die *Fovea centralis* diese Construction hat, da ein physiologischer Punkt in derselben etwa der Grösse eines Empfindungskreises gleich ist. Ja man würde nach den Hensen'schen Untersuchungen (Virchow's Archiv 1867, Bd. 39, p. 477) die *Fovea centralis* in dieser Beziehung sogar als ein »übercorrigirtes Instrument« anzusehen haben, indem die Distinctionsfähigkeit auf Kosten der Continuität der empfindenden Fläche vergrössert worden ist.

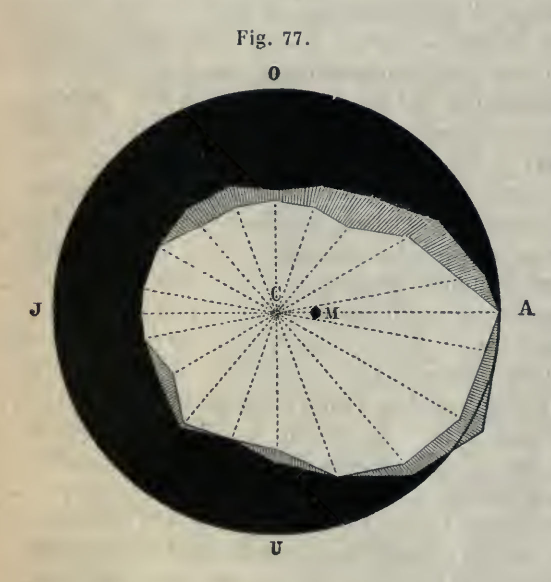
§ 56. Die Ausdehnung des Gesichtsfeldes. Blinder Fleck. — Mit dem Ausdruck »Gesichtsfeld« bezeichne ich im Sinne der Ophthalmologen denjenigen Theil der Netzhaut, welcher Lichtempfindung vermittelt. Die Wichtigkeit der Bestimmung der Grenzen des Gesichtsfeldes für die Ophthalmologie ist zuerst von ALBRECHT v. GRAEFE nachgewiesen worden (Arch. f. Ophthalm. 1856, II. 2, p. 286), indem er in pathologischen Fällen charakteristische Beschränkungen des Gesichtsfeldes fand. Das Problem hat schon PTOLEMÄUS (s. ARAGO, Astronomie I. p. 145) experimentell zu lösen versucht, dann haben VENTURI (s. ebenda), YOUNG (Philosophical Transactions 1801, p. 44), PURKINJE (Beobachtungen 1825, II. p. 6) darüber Messungen gemacht, in neuerer Zeit haben namentlich FÖRSTER, LANDOLT, USCHAKOFF und REICH (s. SNELLEN und LANDOLT dieses Handbuch III. 1,

p. 58 und p. 71) Bestimmungen über die Grenzen des Gesichtsfeldes normaler Augen vorgenommen.

Die peripherische Grenze der empfindenden Netzhautfläche wird mittelst des Perimeters (§ 42 und dieses Handbuch III. 1, p. 56) bestimmt, indem man, während das Auge den Scheitelpunkt des Gradbogens unverwandt fixirt, ein Object, z. B. ein kleines weisses Quadrat auf schwarzem Grunde, von der Peripherie nach dem Centrum zu schiebt und den Theilstrich des Gradbogens, bei welchem das helle Object zuerst bemerkt worden ist, abliest. In diesem Handbuche III. 1, p. 58 haben Snellen und Landolt die Grenzen des Gesichtsfeldes normaler Augen angegeben, aber mit Berücksichtigung pathologischer Interessen die Ausdehnung nicht von dem fixirten Punkte oder der *Fovea centralis,* sondern von der Eintrittsstelle des Sehnerven, der *Papilla optica* an gerechnet.

Alle Messungen seit Venturi haben ergeben, dass das Gesichtsfeld im horizontalen Meridiane eine grössere Ausdehnung hat, als im verticalen Meridiane, und ferner, dass von der *Fovea centralis* aus gerechnet die Ausdehnung am grössten ist von der medianen Seite der Netzhaut (also auf den Raum bezogen nach aussen), am geringsten an der unteren, etwas grösser an der lateralen und noch etwas grösser an der oberen Seite.

Fig. 77.



Die beistehende Figur 77 zeigt in dem weissen Felde die Ausdehnung des Gesichtsfeldes für mein rechtes Auge auf den Raum bezogen, nach Messungen meines verehrten Freundes Förster. Wenn ich in der Zeichnung den oberen Theil des verticalen Meridians mit 0° bezeichne und die um je 20° in der Richtung nach aussen hin entfernten folgenden Meridiane mit 20°, 40°, 60° u. s. w., so fand Förster an meinem rechten Auge folgende Zahlen für die Ausdehnung des Gesichtsfeldes:

(Oben) 0°	20°	40°	60°	80°	(Aussen) 90°	100°	120°	140°	160°
45°	45°	45°	60°	75°	90°	85°	85°	80°	70°

(Unten) 180°	200°	220°	240°	260°	(Innen) 270°	280°	300°	320°	340°
55°	55°	58°	47°	55°	55°	55°	55°	45°	45°

Es ergiebt sich daraus für den horizontalen Meridian bei mir eine Ausdehnung von 145°, für den verticalen Meridian von 100°. Landolt fand grössere Zahlen, ebenso Uschakoff und Reich (dieses Handbuch III. 1, p. 59), und zwar für Emmetropen horizontal 142° im Maximum, 137° als Minimum, vertical 120° im Maximum, 114° im Minimum. Förster giebt gleichfalls grössere Zahlen für

das normale kleinste Gesichtsfeld an (Möser, Diss. inaug. Breslau 1869, p. 24). Da meine Augen zur Zeit der Untersuchung in allen Beziehungen gut waren und in den folgenden 12 Jahren bis jetzt sehr gut geblieben sind, so dürften wohl die Normalzahlen etwas niedriger anzusetzen sein.

Etwas grösser wird die Ausdehnung des Gesichtsfeldes, wenn man dem Auge eine solche Stellung giebt, dass die umgebenden Theile: Nase, Augenlider u. s. w. nicht im Wege sind. Man kann das erreichen, wenn man einen Punkt etwa 20°—30° von dem Scheitelpunkte des Perimeters nach der entgegengesetzten Seite, als man misst, gelegen fixirt. Förster hat bei mir folgende Zunahme gefunden:

0°	20°	40°	60°	80°	90°	100°	120°	140°	160°
5°	10°	15°	15°	10°	0°	5°	10°	5°	0°
180°	200°	220°	240°	260°	270°	280°	300°	320°	340°
5°	0°	2°	8°	0°	0°	0°	0°	10°	10°

In Figur 77 ist diese Erweiterung des Gesichtsfeldes durch den schraffirten Theil ausgedrückt.

Dies stimmt ziemlich überein mit Landolt, ausgenommen in der Erweiterung des Gesichtsfeldes nach Innen (lateralwärts für die Netzhaut) — denn während bei mir die Zunahme = 0 ist, findet Landolt eine Zunahme von 25°. Worauf diese Verschiedenheit beruht, weiss ich nicht. Indess möchte ich glauben, dass Purkinje ähnliche Erfahrungen gemacht hat, wie ich, da er (Beiträge II. p. 7) sagt: »Wenn die Fläche der Retina beim gewöhnlichen Vorsichhinsehen unausgesetzt durch schief einfallende Lichtstrahlen in Erregung und Uebung ist, so bleiben diejenigen Partien derselben, denen durch oben angeführte Theile das Gesichtsfeld beschränkt wird, ausser Erregung und Uebung, und sind daher in einem lähmungsartigen Zustande.« Nebenbei sei hierzu bemerkt, dass die Erklärung, welche Purkinje giebt, mir nicht haltbar scheint, denn Nase, Augenbrauen u. s. w. sind für die Netzhaut doch auch beleuchtete Theile der Aussenwelt — und ob ein mit den Centralorganen in Verbindung stehender Nerv durch lange Nichterregung gelähmt werden kann, ist sehr zweifelhaft.

Die Untersuchungen ergeben aber, dass die Grenze der *Ora serrata* nicht die Grenze des empfindenden Theiles der Netzhaut ist, die erstere vielmehr weiter reicht.

Dies wäre also der Umfang des Sehvermögens für ein unbewegtes Auge. Für beide unbewegte Netzhäute beträgt der Gesammtumfang des Gesichtsfeldes 180° im horizontalen Meridiane. — Ferner wird durch die Bewegungen der Augen der Umfang des Gesichtsfeldes noch bedeutend vergrössert. Helmholtz (Physiologische Optik p. 461) hat diese Grösse als Blickfeld bezeichnet. Es beträgt bei mir (von Förster gemessen) nach

oben 30° — unten 57° — innen 44° — aussen 38° —

oben innen 40° — oben aussen 38°, unten innen 49°, unten aussen 35°.

Helmholtz giebt (Physiol. Optik p. 459) an, dass er bei stärkerer Anstrengung in horizontaler Richtung etwa 50° nach beiden Seiten, und etwa 45° nach oben und nach unten (s. § 74) übersehe. Im Ganzen können wir also bei unbewegtem Kopfe im horizontalen Meridiane etwa 260°, im verticalen Meridiane etwa 200° des Raumes übersehen.

In der empfindenden Netzhautfläche ist eine Lücke, welche durch die Ein-

trittsstelle des Sehnerven, den Mariotte'schen oder blinden Fleck gebildet wird (Mariotte, Philosophical Transactions 1668, II. und Mémoires de l'Académie de Paris 1669 und 1682) Figur 77 *M*. Dass die ganze Eintrittsstelle des Sehnerven oder die *Papilla optica* es ist, welche kein Licht empfindet, geht theils aus den Messungen des blinden Flecks an lebenden Augen (Hannover, Das Auge 1832, p. 80 — Listing bei E. H. Weber, Berichte der Leipziger Akademie 1852, p. 152 — Helmholtz, Physiologische Optik p. 212 — Landolt dieses Handbuch III. 1. p. 60) hervor, theils aus den Versuchen von Donders (Onderzoekingen gedaan in het Physiol. Laboratorium der Utrechtsche Hoogeschool 1852, VI. p. 134) und Coccius (Ueber Glaucom, Entzündung und die Autopsie mit dem Augenspiegel 1859, p. 40 und 52), welche nachwiesen, dass, so lange das von einem Augenspiegel geworfene Lichtbildchen die Grenze der *Papilla optica* nicht überschreitet, keine Lichtempfindung stattfindet. Man bestimmt die Grösse des blinden Fleckes, indem man einen Punkt auf einem Papierblatte oder auf dem Perimeterbogen fixirt, bei verdecktem andern Auge und gut unterstütztem Kopfe, und eine helle Marke auf dunklem Grunde, oder umgekehrt, so lange verschiebt, bis sie verschwindet: wenn man nun bei unveränderter Fixation die Marke nach verschiedenen Richtungen verschiebt oder verschieben lässt, und die Punkte angiebt, wo sie eben zum Vorschein kommt, so findet man die Grenzen des blinden Fleckes. Helmholtz hat nach dieser Methode den blinden Fleck seines rechten Auges aufgezeichnet, indem er statt der Marke eine in Tinte getauchte weisse Federspitze benutzte. (Physiol. Optik p. 212, Figur 101.)

Nach den verschiedenen Messungen beträgt im Mittel die Entfernung des lateralen Randes des blinden Fleckes von dem Gesichtspunkte $12\frac{1}{2}^{\circ}$, der des medianen Randes $18\frac{1}{2}^{\circ}$. Die individuellen Differenzen sind ganz erheblich. (Eine Zusammenstellung von Angaben s. auch in Aubert, Physiologie der Netzhaut p. 256.)

Die Behauptung von Fick und P. Dubois-Reymond (Müller's Archiv 1853, p. 396), dass sehr intensives Licht, welches auf die *Papilla optica* fällt, in derselben eine Lichtempfindung hervorbringe, ist von Helmholtz (l. c. p. 211) dahin erledigt, dass sich ein Theil des Lichtes auf die anstossenden Theile der Netzhaut verbreitet und von diesen der schwache Lichtschein empfunden wird.

Dass wir beim gewöhnlichen Sehen nichts von einer Lücke im Gesichtsfelde bemerken — daher denn auch Mariotte's Entdeckung seiner Zeit grosses Aufsehen erregte (Helmholtz l. c. p. 222), soll theils daran liegen, dass wir mit beiden Augen sehen, theils daran, dass wir die Augen viel bewegen, theils daran, dass wir das indirect Gesehene nur sehr oberflächlich beachten — der eigentliche Grund ist aber wohl der, dass wir eben nichts mit dieser Stelle sehen, und, um es kurz zu sagen, eben nicht wissen, wie Nichts aussieht. Eine Lücke in der Netzhaut ist nicht eine Lücke im Gesichtsfelde: was sollen wir denn zu sehen erwarten, wenn wir mit einem Auge auf den gleichmässig hellen Himmel, oder auf eine Papierfläche sehen? Dass man überhaupt erwarten konnte, etwas zu sehen, kann nur seinen Grund in der falschen Auffassung haben, dass man den Mangel an objectivem Lichte gleichbedeutend mit dem Mangel an Empfindung nahm, und etwa erwartete, ein Loch oder eine dunkle Stelle zu sehen.

Was auf die Stelle des blinden Fleckes fällt, sieht man nicht, aber etwas anderes sieht man auch nicht. Wenn Volkmann (Berichte der Leipziger Akademie

1853, p. 27 und 149) den Kreuzungspunkt farbiger Linien mit einer kleinen Oblate bedeckt, und das Bild der letzteren auf den blinden Fleck fallen lässt, so glaubt man bald die eine, bald die andere Linie an der verdeckten Stelle zu sehen und kommt (p. 41) zu dem Paradoxon: man sähe Dinge, welche nicht da wären, dadurch, dass man sie auf den blinden Fleck fallen liesse. Weder Helmholtz (Physiol. Optic p. 575) noch ich (Physiologie der Netzhaut p. 257) haben eine derartige Ergänzung mit Sicherheit sehen können. Eben so wenig kann ich die von v. Wittich (Arch. f. Ophthalm. 1863, IX. 3, p. 1—31) angegebenen Veränderungen sehen (Physiol. d. Netzhaut p. 258).

Ausser dem Mariotte'schen Flecke hat Coccius (Glaucom u. s. w. 1859, p. 42) noch mehrere blinde Flecke im Auge nachgewiesen und zur Auffindung derselben folgendes Verfahren angegeben: man bezeichnet durch einen grösseren schwarzen Fleck auf weissem Papier die Stelle für den Eintritt des Sehnerven, darüber und darunter macht man einen schmalen Strich oder Punkt und lässt nun durch eine Skala von Punkten zu beiden Seiten desjenigen Fleckes, welcher dem Sehnerveneintritte entspricht, das Auge langsam von einem Punkte zum andern fortschreiten, bis der Strich oder Punkt plötzlich verschwindet.

Auch Förster und ich (Arch. f. Ophthalm. 1857, III. 2, p. 32) haben bei Gelegenheit unserer Beobachtungen über das indirecte Sehen, gleichfalls das Vorhandensein von kleinen blinden Flecken bemerkt, und ich bin bei späteren Beobachtungen am Perimeter vielfach auf dieselben gestossen. — Coccius leitet diese kleinen Lücken im Gesichtsfelde von den Centralstämmen der Netzhautgefässe ab.

Im Hinblick auf die Unterbrechungen der Continuität der empfindenden Netzhautfläche mache ich darauf aufmerksam, dass die Vorstellung der Continuität aprioristischer Natur ist, dass wir *a priori* geneigt sind, den Objecten eine Continuität beizulegen und diese Annahme so lange festhalten, als die sinnlichen Empfindungen und Wahrnehmungen derselben nicht direct widersprechen.

§ 57. Die empfindende Netzhautschicht. — Es ist die Frage, wo die Empfindung des Lichtes ihren Anfang nimmt, oder wo die Bewegung des Lichtäthers anfängt, in Nerventhätigkeit umgesetzt zu werden? Mariotte (Oeuvres 1740, p. 496) schloss aus seinen Versuchen über den blinden Fleck, dass die Chorioidea dieses Organ sein müsse, weil die Netzhaut auch da sei, wo der blinde Fleck liege, die Chorioidea aber nicht, und zweitens, weil die Netzhaut so durchsichtig im frischen Auge sei, dass sie alles Licht durchlasse. De la Hire (Mémoires de l'Acad. 1709, Vol. IX. p. 617) wandte dagegen ein, die Netzhaut müsse das Werkzeug des Sehens sein, weil sie eine Ausbreitung des Sehnerven sei und Empfindungen nicht ohne Nerven stattfinden könnten. (Smith-Kästner, Lehrbegriff der Optik 1755, p. 368.)

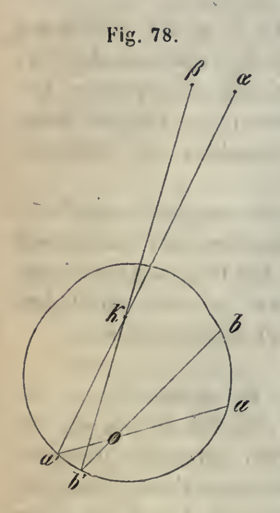
Treviranus (Beiträge zur Aufklärung der Gesetze und Erscheinungen des organischen Lebens 1835, II. p. 42) hat wohl zuerst die Stäbchenschicht der Netzhaut als das die Lichtempfindung vermittelnde Organ angesehen und die weitere Ausführung und Begründung dieser Hypothese ist von Heinrich Müller (Würzburger Verhandlungen 1855, Bd. V. p. 411) beigebracht worden.

Der Gedankengang bei Heinrich Müller ist folgender: Die Purkinje'sche Ader-

figur (s. § 20) wird durch den von den Netzhautgefässen geworfenen Schatten erzeugt — die lichtpercipirende Schicht muss folglich hinter derjenigen Schicht der Netzhaut liegen, in welcher die Blutgefässe verlaufen — die Gefässe verlaufen grösstentheils hinter der Schicht der Opticusfasern, nur zum Theil in derselben, aber nicht vor derselben — folglich müssen die hintersten (äussersten) Elemente der Netzhaut von dem Schatten der Gefässe getroffen werden. — Die Grösse der Bewegung, welche die Aderfigur bei Bewegung der Lichtquelle macht, ergiebt, dass die lichtpercipirende Schicht so weit hinter den Gefässen liegt, als die Stäbchenschicht hinter denselben bei directer Messung gefunden wird: folglich muss die Zapfen- und Stäbchenschicht die lichtpercipirende Schicht sein.

H. Müller verfuhr dabei folgendermassen: er projicirte die Aderfigur auf eine Fläche, deren Entfernung vom Auge bestimmt war, liess die Lichtquelle eine Excursion von bestimmter Grösse auf der Sclerotica machen (s. § 20) und bestimmte nun die Grösse der Verschiebung eines Gefässästchens, welches er zur Beobachtung wählte, auf der Fläche. Ist in Figur 78 ab die Verschiebung des Lichtpunktes auf der Sklera, $\alpha\beta$ die Verschiebung der Projection auf der Tafel, so wird $a'b'$ die Verschiebung des Gefässschattens auf der Netzhaut sein: zieht man die Linien aa' und bb', so ist der Punkt, wo sich diese Linien schneiden, der Ort des schattenwerfenden Objectes, welcher durch Rechnung gefunden werden kann. Heinrich Müller hat für die Entfernung der Gefässe von der empfindenden Schicht an seinen eignen Augen 0,17 Mm. bis 0,33 Mm. gefunden. Die Messungen an anatomischen Präparaten haben Müller für diese Entfernung der Gefässe von der Stäbchen- und Zapfenschicht in der Nähe des gelben Flecks 0,2 Mm. bis 0,3 Mm. ergeben, woraus Müller schliesst, dass ungefähr in der Zapfenschicht der Schatten der Netzhautgefässe auf die Anfänge der empfindenden Organe fällt. — Da Müller nichts Näheres über die direct gefundenen Werthe und seine Berechnung der angeführten Grössen angegeben hat, so bleiben die erheblichen Differenzen seiner physiologischen Bestimmungen unklar, und ein sicherer Beweis, dass die Stäbchen- und Zapfenschicht die empfindende Schicht sei, scheint nicht geliefert — man kann nur so viel mit Sicherheit annehmen, dass die empfindende Schicht eine gewisse Strecke hinter den Netzhautgefässen liegen muss. Allerdings sprechen noch andere, sogleich zu erwähnende Thatsachen für die Müller'sche Hypothese.

Fig. 78.



Die histologischen Untersuchungen geben bisher noch keine Anhaltspunkte für die Frage, wo die nervösen Elemente der Netzhaut aufhören: ein Zusammenhang der Fasern diesseits und jenseits der *Limitans externa* ist nicht nachgewiesen, soll sogar aus mancherlei histologischen Gründen unwahrscheinlich sein (s. dieses Handbuch I. 1, p. 449). Anderseits sind die anatomischen Verhältnisse der *Fovea centralis* kaum anders zu deuten, als dass ein Zusammenhang zwischen den Zapfen und den nervösen Elementen existirt, den wir doch anzunehmen genöthigt sind; denn was sollte sonst die Empfindung in denselben vermitteln?

Der Umstand, dass die nervöse Natur der Stäbchen und Zapfen zweifelhaft ist, würde keine wesentliche Bedeutung für die Frage haben, wo die Lichtbewegung eine Umsetzung erfährt, denn es ist sogar zu erwarten, dass an den Endorganen der Nerven andere Vorrichtungen sind, als in den leitenden Fasern, weil in den Endorganen andere, als die zur Leitung erforderlichen Processe vor sich gehen müssen. Andernfalls würden ja die Nervenfasern einfach als solche endigen müssen.

Wir werden also auch zu fragen haben: wenn die Stäbchen und Zapfen die die Empfindung vermittelnden Endorgane nicht sind, welche anderen Elemente sollen es denn sein? Es lässt sich keines der Elemente nennen, welche mit nur einiger Wahrscheinlichkeit als nervöses Endorgan angesehen werden könnte. (cf. Volkmann, Handwörterbuch der Physiologie II. p. 570 und III. 1, p. 272. — Helmholtz, Beschreibung eines Augenspiegels 1851, p. 39.)

Da nun, wie wir oben § 52 gesehen haben, die Wahrnehmbarkeitsgrenze kleinster Distanzen der Grösse der Zapfen in der *Fovea centralis* als empfindender Elemente nicht widerspricht — die Anordnung der Zapfen daselbst von der Art ist, dass sie für die Wahrnehmung distincter Punkte sehr zweckmässig erscheint, — in der Mitte der *Fovea centralis*, der Stelle des schärfsten Sehens nur Zapfen und sonst kaum Spuren der übrigen Schichten sich finden, — die Versuche Müller's zu der Annahme nöthigen, dass die Empfindung eine Strecke weit hinter den Netzhautgefässen beginnt: so bleibt wohl keine andere Annahme möglich, als dass in der Stäbchen- und Zapfenschicht der Empfindungsprocess seinen Anfang nimmt.

Es ist aus dieser Darlegung aber auch ersichtlich, dass wir nichts darüber aussagen können, ob etwa die Aussenglieder oder die Innenglieder der Zapfen die physiologischen Endorgane seien. Wenn Brücke (Müller's Archiv 1844, p. 444) ihnen eine musivische Wirkung, M. Schultze und Zenker (Archiv für mikroscop. Anatomie 1867, III. p. 243) ihnen einen besonderen Einfluss auf die Lichtwelle zuschreiben, so ist in diesen Hypothesen kein Widerspruch gegen die obige Annahme enthalten.

Welche Unterschiede endlich zwischen den Functionen der Stäbchen und der Zapfen vorhanden sein mögen, darüber ist kaum etwas anderes, als Vermuthungen vorhanden. (cf. Max Schultze, Archiv f. mikroscop. Anatomie 1866, II. p. 165 und 247 — 1867, III. p. 215. — Schwalbe, dieses Handbuch I. 1, p. 415.)

D. Die Projection der Gesichtsempfindungen.

§ 58. Standpunkt. Aufgabe der Untersuchung. — Es ist eine allgemeine Eigenschaft unserer Sinnesempfindungen, dass dieselben nicht an den Ort, wo die Empfindung ausgelöst wird, sondern in den Raum versetzt werden, welchen wir uns *a priori* vorstellen. Wir kennen weder den Theil unseres Gehirns, in welchem die Empfindung perfect wird, noch den Theil, welcher die Vorstellung des Raumes producirt, und wissen nur so viel, dass jeder qualitativen Empfindung eine sogenannte extensive Empfindung, d. h. der Zwang anhaftet, im Raume localisirt zu werden. — Wenn wir nun eine Anzahl qualitativ gleicher Empfindungen gleichzeitig haben, so stellen wir uns vor, dass dieselben ver-

schiedene Stellen im Raume einnehmen, und sind überhaupt nicht im Stande, uns unter diesen Bedingungen etwas Anderes vorzustellen. Wir finden ferner, dass wir die Empfindungen an irgend welche Orte des Raumes in Beziehung auf uns selbst setzen und sie ausserdem in räumliche Beziehung zu einander setzen.

In Beziehung auf uns selbst werden die Empfindungen zu Objecten, denen wir unsere Empfindung als Eigenschaft beilegen, und wir streben darnach, andere Empfindungen durch die supponirten Objecte zu erlangen. Eine Lichtempfindung z. B. inducirt den Versuch, eine Tastempfindung zu erhalten, und haben wir eine solche gewonnen, so stellen wir uns ein Object mit zwei Eigenschaften vor, indem wir uns die Lichtempfindung und die Tastempfindung nicht als in uns producirt, sondern als von dem Objecte ausgehend und ihm inhärirend vorstellen. Der gewollte Versuch, eine Tastempfindung zu gewinnen, welcher gelingt, setzt zugleich das Object als solches (als Ding) in Beziehung zu uns, und wir machen eine Erfahrung über dasselbe.

Zweitens bringen wir die in den Raum versetzten Empfindungen in Beziehung zu einander, zeitlich oder räumlich. Abgesehen von zeitlichen Beziehungen, construiren wir, zunächst in so weit die Empfindungen qualitativ ähnlich sind, Formen für dieselben, und richten nach diesen Formen unsere Bewegungen ein, sowohl die der Augen, als die unserer tastenden Glieder. Wir erfahren, durch welche gewollten Bewegungen gewisse Empfindungen erreicht werden, und so entwickelt sich eine gegenseitige Beziehung von Empfindungen zu Bewegungen und von Bewegungen zu Empfindungen.

Eine weitere Frage ist nun, ob eine prästabilirte, d. h. durch die Organisation unserer Empfindungs- und Bewegungs-Centra gegebene Harmonie oder richtiger ein prästabilirter Zwang zwischen Empfindungen und Bewegungen ursprünglich gegeben ist. Bei den Thieren, welche gleich nach der Geburt eben so bestimmte Bewegungen ausführen, als im späteren Leben, z. B. den Bienen, den Meerschweinchen, den Hühnern (s. Cuvier, Mémoires du Museum d'Histoire naturelle X, p. 257 und Abbott, Sight and Touch, London 1864, p. 163—173. — p. 168: »*Sir Joseph Banks said he had seen a chicken catch at a fly whilst the shell stuck to its tail*«.) muss ein derartiger Zwang statuirt werden. Für den Menschen ist ein solcher Zwang auch gegeben — neben demselben werden aber Kräfte im Organismus frei, welche als sogenannter freier Wille diesem Zwange entgegenwirken. Ein solcher Zwang existirt z. B. für die Bewegungen der Augen, wenn den Empfindungen das Localzeichen des indirect Gesehenen anhaftet: es erfolgt dann eine Bewegung des Auges, welche das Localzeichen des direct Gesehenen hervorzurufen bestimmt ist, und der Zwang zu dieser Bewegung ist etwa eben so gross, wie der Zwang, sich zu kratzen, wenn es juckt. Die Bewegung kann unterdrückt werden durch antagonistische Willensimpulse, aber die Bewegungsintention ist vorhanden, bleibt bestehen, und löst die Bewegung aus, sobald die Willensintention kleiner wird, als die Bewegungsintention. Aber nicht blos die Bewegung, sondern auch die Grösse und Richtung der Bewegung ist eine zwangsweise gegebene, sie erfolgt, wenn nicht durch den Willen gehemmt wird, mit grösster Präcision: der indirect gesehene aufspringende Hase wird von dem Jäger sofort direct gesehen, d. h. fixirt. Was hierbei angeboren und was durch Erfahrungen u. s. w. verändert ist, wird allgemein sich nicht ausdrücken lassen,

— nur im speciellen Falle wird eine Analyse des Vorganges in Bezug auf Angeborenes und Angenommenes gelegentlich möglich sein.

Da nun über die Localzeichen und ihr Organ nichts bekannt ist, so hat man den Weg eingeschlagen, unsere räumlichen Empfindungen auf den einzigen bekannten Theil des Empfindungsorganes, auf die Netzhaut zu reduciren, indem man bewusst oder unbewusst die Annahme machte, d a s s d e n r ä u m l i c h u n t e r s c h e i d b a r e n P u n k t e n d e r N e t z h a u t a u c h c o n s t a n t e u n t e r s c h e i d b a r e L o c a l z e i c h e n i m S e n s o r i u m e n t s p r e c h e n, und zwar genau Punkt für Punkt entsprechen, dass wir mithin unsere Empfindungen auch der Anordnung der empfindenden Netzhautelemente gemäss im Raume anordnen, oder in den Raum projiciren. Wenn dem Netzhautpunkte a das Localzeichen x, dem Netzhautpunkte b das Localzeichen y entspricht, so setzen wir die Verbindung von a mit x und von b mit y als constant und unveränderlich voraus und projiciren x auf dem Wege über a, y auf dem Wege über b in den Raum hinaus. Unter Voraussetzung dieser Constanz gewinnen a und b selbst die Bedeutung eines Localzeichens; x und y sind dabei nach dem in § 51 Erörterten nicht räumlich, sondern qualitativ different zu denken.

Eine weitere Complication dieses Verhältnisses zwischen Sensorium und Netzhaut bietet der Umstand, dass wir zwei Netzhäute haben, welche mit dem Sensorium verbunden sind: es werden also Localzeichen durch jede der beiden Netzhäute passiren und auch nach aussen projicirt werden müssen. Ob nun e i n Weg da ist, auf welchem die Empfindungen in den Raum versetzt werden, oder v i e l e Wege, welche zu dem gleichen Ziele führen, würde nichts ändern, so lange nur e i n Sensorium vorhanden ist. —

Aber die ganze Frage nach der Localisation unserer Empfindungen wird durch die naive Ansicht vom Raum und den Objecten verschoben: wir sind aus unbekannten Gründen von vornherein überzeugt, dass der Raum und die Objecte etwas Wirkliches sind und stellen daher die Frage, o b u n s e r e L o c a l i s a t i o n e n C o r r e l a t e d e s W i r k l i c h e n s i n d? Da das Wirkliche nur insofern existirt, als es von uns empfunden und localisirt wird, so kann eigentlich die Frage nur bejaht werden, wie z. B. PORTERFIELD (Treatise on the Eye, 1759, II. p. 293) auch gethan hat, wenn er sagt, »wir sehen die Dinge da, wo sie sind« *(the faculty we have of seeing Things in the Place, where they are)*.

Es kann von unserm Standpunkte aus eigentlich nur die Frage gestellt werden: o b d i e v o n u n s g e m a c h t e n L o c a l i s a t i o n e n u n s e r e r E m p f i n d u n g e n m i t e i n a n d e r ü b e r e i n s t i m m e n, o d e r o b W i d e r s p r ü c h e i n d e n L o c a l i s i r u n g e n i m R a u m e v o r k o m m e n? Das letztere ist in der That der Fall unter besonderen Umständen, und wenn wir auch die entstehenden Conflicte leicht so weit entscheiden, dass darunter die Exactheit unserer Bewegungen nicht leidet, so müssen doch jedenfalls die Bedingungen der Conflicte und die Regeln, nach welchen wir sie entscheiden, untersucht werden. Beispiele von sich widersprechenden Localisationen werden wir im Folgenden vielfach zu erörtern haben, und es wird dabei meist wenig ändern, ob wir, unserer naiven Vorstellung folgend, wirkliche Objecte im wirklichen Raume voraussetzen, oder nicht. D a s i c h d i e S p r a c h e u n t e r d e r H e r r s c h a f t d e r n a i v e n V o r s t e l l u n g d e r W i r k l i c h k e i t e n t w i c k e l t h a t, so werden wir im Folgenden u n s m e i s t e n s d i e s e r V o r s t e l l u n g g e m ä s s a u s z u d r ü c k e n

haben, um weitläufige und schwerverständliche Umschreibunge
zu vermeiden. Wir würden z. B. statt »man sieht einen Körper« sagen müssen
»man projicirt die einzelnen Punkte des Netzhautbildes in verschieden grosse Ent-
fernungen, welche in einer solchen Relation zu einander stehen, dass sie auf di
Vorstellung eines nach drei Dimensionen ausgedehnten Raumstückes bezoge
werden müssen«.

Wenn Hering (Beiträge zur Physiologie 1862, II. p. 165) »einen wirklichen, im Grund
auch subjectiven Raum« von einem »subjectiven Raume im engeren Sinne, d. h. dem Raume
wie er fürs Auge da ist« unterscheidet, so scheint er dieselbe Ansicht über den Grad unsere
möglichen Erkenntniss zu haben, wie ich sie in § 51 auf Grund der Kant'schen Lehre ent-
wickelt habe. Helmholtz (Physiologische Optik p. 441 u. f., überhaupt in § 26) steht au
einem weniger subjectiven Standpunkte. Für eine nähere Besprechung der sich auf diesen
Gebiete entgegenstehenden Theorien scheint mir hier nicht der passende Ort.

Wir werden zu untersuchen haben, wie wir localisiren mittelst *eines* un
zwar *unbewegt* gedachten Auges, zweitens wie wir mit *beiden*, unbeweg
gedachten Augen localisiren, drittens, welchen Einfluss die *Bewegungen* de
Augen auf die Localisirung unserer Empfindungen haben.

§ 59. *Monoculare Projection des unbewegten Auges.* — Wi
können die Leistungen des einen unbewegten Auges nur untersuchen zu eine
Zeit, wo wir mit Hülfe sämmtlicher disponiblen Mittel schon sehr bestimmte Vor-
stellungen vom Raum und von den Objecten gewonnen haben — die Unter-
suchung wird ferner dadurch beeinträchtigt, dass wir gewohnt sind, nur au
einzelne Merkmale der Objecte Achtung zu geben und auf Grund derselben so-
gleich die gesammte Vorstellung von dem Objecte zu reproduciren — endlich sin
wir nicht im Stande, die Bewegungen des geschlossenen Auges zu unterdrücken
wenn das offene Auge z. B. auf Punkte blickt, welche hintereinander in ein un
derselben Richtung liegen. Daher bemerken die meisten Menschen keinen Unter-
schied im Sehen, wenn sie das eine Auge schliessen: ist doch erst Leonardo d
Vinci (Mahlerey 1786, p. 80, die erste Ausgabe des Trattato della Pittura is
von 1584) darauf aufmerksam geworden, dass man bei geschlossenem einem Aug
von den hinter einem Körper befindlichen Objecten etwas weniger sieht, als wen
beide Augen offen sind.

Unter den gegebenen Bedingungen beobachten wir: 1) dass wir unser
Empfindungen *nach aussen projiciren* oder *in den Raum versetzen*
Dass dies auf einem angeborenen Zwange, nicht auf gewonnener Erfahrung beruht
scheint mir am sichersten daraus hervorzugehen, dass wir unbekannte Empfin-
dungen in gleicher Weise projiciren: Jeder, dem die Purkinje'sche Aderfigur zum
ersten Male sichtbar wird, und zwar in einem möglichst finstern Raume, projicir
dieselbe in den Raum; ebenso Jeder, der bei geschlossenen Augen, wenn da
eine von der Sonne beschienen wird, die Bewegung der Blutkörperchen sieht;
desgleichen die durch Druck auf die Netzhaut hervorgebrachten leuchtenden Punkt
und die Nachbilder und sonstige Phantasmen sowohl bei offenem als bei ge-
schlossenem Auge.

2) *Wir projiciren ungefähr nach den Richtungslinien der Ob-
jecte*, also nach Linien, welche wir uns von den einzelnen Objectpunkten ode
Netzhautpunkten durch den hinteren Knotenpunkt gelegt denken können; die

geht namentlich aus den parallaktischen Bewegungen der Purkinje'schen Aderfigur (s. § 57) hervor und aus den Druckfiguren. (Joh. Müller, Beiträge zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes 1826, p. 71 und Handbuch der Physiologie 1840, II. p. 377.) Wenn wir genau nach den Richtungslinien der Objecte projicirten, so würden wir monocular die Objecte ebendaselbst sehen, wo sie uns beim binocularen Sehen erscheinen. Das ist aber nicht immer der Fall (s. § 60). Die Erwartung, welche man gehabt hat, dass wegen der Ausbreitung der Netzhaut in Form einer hohlen Halbkugel auch die Projectionen in einer entsprechenden Halbkugel angeordnet erscheinen würden, bestätigt die Beobachtung nicht: man kann überhaupt nicht sagen, dass man die Projectionen, bei möglichster Unbeschränktheit des Projicirens, z. B. die der Aderfigur, in einer näher bestimmbaren Form einer Fläche sieht — Helmholtz (Physiol. Optik p. 533) sagt: die Gegenstände erscheinen »wie an einer Fläche, in einer nach zwei Dimensionen unterschiedenen Anordnung«. Man wird kaum einen angemesseneren Ausdruck finden können für das, was man monocular sieht, wenn man es vermeidet, bekannte und perspectivisch sehr stark gekennzeichnete Objecte monocular anzuschauen. Recht geeignet ist der Sternhimmel oder noch mehr ein mit unregelmässig geformten Wolken oder Wölkchen bedeckter Himmel. Jedenfalls ist die Projectionsfläche nicht ein Stück einer Hohlkugel, sondern eine viel unbestimmtere Form, und diese unbestimmte Form geht wohl hervor aus der Undeutlichkeit des indirecten Sehens.

3) Wir projiciren in eine sehr unbestimmte Entfernung von uns (d. h. beurtheilen die Entfernung von Objecten sehr mangelhaft), wenn wir möglichste Freiheit haben, d. h. nicht durch die Accommodation für eine bestimmte Entfernung oder durch vorher erworbene Kenntniss der Umgebungen beschränkt werden. Es scheint mir aber, dass wir auch bei ein und derselben Accommodation, und zwar für sehr grosse Ferne, wenn wir z. B. monocular nach dem Himmel sehen, in verschiedene Entfernung projiciren: wenn unter diesen Umständen eine Fliege vor unserm Auge vorbeifliegt, so erscheint sie hoch in der Luft wie ein grosser Vogel, wird also in sehr grosse Ferne projicirt — unter gleichen Bedingungen erscheinen dagegen die entoptischen *mouches volantes* keineswegs in sehr grosse Entfernung projicirt. Allerdings ist aber der Accommodationszustand des Auges von Einfluss auf die Entfernung, in welche wir projiciren, und zwar projiciren wir ungefähr in die Entfernung, für welche das Auge accommodirt ist, aber keineswegs sicher und regelmässig. Wundt (Theorie der Sinneswahrnehmung 1862, p. 106 u. f.) hat Messungen über die Genauigkeit, mit welcher beim monocularen Sehen Entfernungen geschätzt werden, angestellt und ist zu dem Resultate gekommen, »dass die Accommodation nichts aussagt über die absolute Entfernung der Gegenstände im Raume, sondern nur eine äusserst oberflächliche Kenntniss ihrer relativen Lage giebt, indem sie es möglich macht, das Nähere vom Entfernteren zu unterscheiden. Eine eigenthümliche, unrichtige Projection tritt ein, wenn man mit Anstrengung accommodirt: accommodire ich (mit einem Nahepunkte zur Zeit von 450 Mm.) auf eine Entfernung von 300 Mm., so tritt Mikropsie ein, aber in der Weise, dass ihrer Grösse nach unbekannte Objecte kleiner erscheinen und in grosse Nähe projicirt werden, dass ihrer Grösse nach bekannte Dinge dagegen in Folge einer Complication mit secundärer Urtheilstäuschung (s. meine Physiologie der Netzhaut p. 329)

kleiner erscheinen und in entsprechend weitere Entfernung projicirt werden. Ich habe derartiges früher bei unvollkommener Lähmung durch Atropin (Förster, Ophthalmologische Beiträge 1862, p. 80) in sehr frappanter Weise beobachtet: ein Mensch in 2—3 Fuss Entfernung, für den ich accommodirte, erschien an der Wand des Zimmers etwa wie eine Photographie. Auch Donders (A. f. Ophthalm. XVII. 2, 1871, p. 27) hat Aehnliches beobachtet. — Mir und den meisten Beobachtern ist es nicht möglich, bei der Accommodation des offenen unbeweglich gerichteten Auges für die Nähe die entsprechende Convergenzbewegung des geschlossenen Auges auszuschliessen — inwiefern die Projection von der Convergenzanstrengung beeinflusst wird, bleibt daher fraglich, allein die Versuche, in welchen das eine Auge schwach atropinisirt wird, beweisen, dass in diesem Falle die Convergenz keinen Einfluss hat. Ich habe (Physiologie der Netzhaut p. 329) schon angegeben, dass ich 30 Minuten nach der Atropinisirung des linken Auges Objecte in etwa 200 Mm. Entfernung mit diesem Auge kleiner gesehen und in grössere Entfernung projicirt habe, als mit dem rechten, obgleich die Convergenz der Augenaxen dieselbe war.

4) Wie die Entfernung, in welche wir beim monocularen Sehen das Netzhautbild projiciren, unbestimmt ist, so ist auch die relative Entfernung, in welche wir verschieden entfernte Theile eines Objectes projiciren, oder in welcher wir sie zu sehen glauben, unsicher und zwar in noch höherem Grade. Donders (A. f. Ophthalm. XIII. 1, p. 37) hat Versuche hierüber in der Weise angestellt, dass ein mit seinem oberen Ende dem Beobachter näherer, mit seinem unteren Ende von dem Beobachter entfernterer geneigter Faden bei der momentanen Beleuchtung mittelst eines Inductionsfunkens monocular gesehen wurde: die Neigung des Fadens wurde nicht erkannt. — Dagegen ist das monoculare Netzhautbild von Objecten, welche durch die Anordnung der Lineamente, der Schattirung und dergleichen den durch frühere Erfahrungen gewonnenen Eindruck, dass sie in der dritten Dimension ausgedehnt sind, machen, geeignet, eine Projection seiner einzelnen Punkte in verschiedene Entfernungen auszulösen. Wir werden darauf in § 63 zurückkommen.

Binoculares Localisiren.

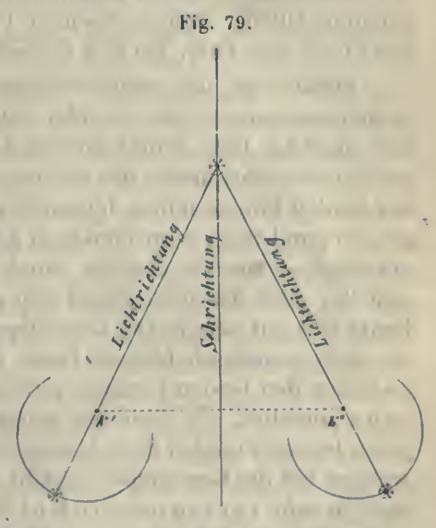
§ 60. **Binoculare Projection und binoculares Einfachsehen.** — Wenn wir unsere beiden Augen auf sehr entfernte Objecte, z. B. den Mond, oder Sterne richten, so macht es keinen Unterschied, wenn wir das eine Auge schliessen oder verdecken für den Fall, dass sich sonst keine Objecte in dem binocularen Gesichtsfelde befinden. Richten wir unsere Augen auf einen näheren Punkt, und nehmen wir an, es befinden sich im binocularen Gesichtsfelde noch verschiedene andere leuchtende Punkte in verschiedener Entfernung von uns, so verändert sich die Anordnung der Punkte sehr bedeutend, wenn wir das rechte, und verändert sich wieder in anderer Weise, wenn wir das linke Auge schliessen oder verdecken. Die Projection unserer Empfindungen ist also jedesmal eine andere, und jede differirt wieder von der Vorstellung, welche wir uns zum Theil auf Grund dieser 3 Projectionen von der Anordnung der leuchtenden Punkte machen, und welche wir der Wirklichkeit congruent setzen. Denken wir uns der Einfachheit wegen nur 3 leuchtende Punkte und diese in der Medianebene gelegen, so sehen wir, wenn wir unsere Augen auf den einen der 3 Punkte richten, jedes-

mal 5 Punkte, von denen je 2 verschwinden, wenn wir das eine Auge schliessen, und zwar 2 andere, wenn wir das linke, und 2 andere, wenn wir das rechte Auge schliessen. Nur der Punkt, auf welchen wir die beiden Augen gerichtet, welchen wir fixirt haben, bleibt unverändert in seiner Lage und wird als ein Punkt gesehen in allen 3 Fällen. Ausserdem ist es allein dieser Punkt, welcher am deutlichsten und ohne Zerstreuungskreise gesehen wird. Diese Momente bestimmen uns, aus den von uns gemachten Projectionen die deutlichste, welche dem leuchtenden Punkte einen Ort anweist, als die für uns massgebende auszuwählen und unsere Bewegungen dieser Projection oder Localisirung gemäss einzurichten — die übrigen Projectionen aber mehr oder weniger zu vernachlässigen oder doch nur so weit zu benutzen, als wir im Stande sind, die Widersprüche mit der massgebenden Projection zu lösen oder zu erklären. Dass wir also aus der Masse der Projectionen eine als massgebend für unsere Vorstellung hervorheben, hat seinen Grund darin, 1) dass nur mit einer sehr kleinen Stelle unserer Netzhaut am schärfsten gesehen wird, 2) dass die Empfindungen an dieser Stelle nur **ein** gemeinschaftliches Localzeichen in unserem Sensorium haben, oder wie man sagt, diese Netzhautpunkte der beiden Augen identische sind, 3) dass unsere Augen für den fixirten Punkt accommodirt sind.

Unter der Herrschaft dieser 3 Momente steht die Localisirung unserer in den Raum projicirten Empfindungen, welche erfahrungsgemäss eine sehr feste, sichere und consequente ist — alle 3 Momente beruhen aber auf einer ganz bestimmten, unveränderlichen Organisation unserer Augen, welche nicht erworben, sondern gegeben ist. Die beiden ersten Momente hat schon Volkmann (Müller's Archiv 1839, p. 240) als für unsere räumlichen Anschauungen wesentliche erkannt.

Wir projiciren also die fixirten Objectpunkte in den Kreuzungspunkt unserer Gesichtslinien und sehen sie unter dieser Bedingung einfach. Da wir sie mit dem rechten und mit dem linken Auge an ein und denselben Ort projiciren, ihre Projection sich nicht ändert, mögen wir binocular oder mit verdecktem einem oder anderem Auge sehen, so folgt daraus, wie Hering (Beiträge zur Physiologie I. 1861, p. 26) gefunden hat, dass wir beim Sehen nicht nach den Richtungslinien (welche Hering »Lichtrichtungen« nennt) projiciren, sondern in einer Richtung, welche von der Mitte zwischen den beiden Augen, der Nasenwurzel aus nach dem Kreuzungspunkte der Gesichtslinien geht. Diese Richtung bezeichnet Hering als »Sehrichtung«. Aus der beistehenden Figur 79 von Hering (l. c. p. 29), in welcher k' k'' die Knotenpunkte der Augen bedeuten, wird Hering's Entdeckung ohne weiteres klar. Der Versuch Hering's, dass der fixirte Punkt seinen Ort nicht verändert, wenn man das eine Auge schliesst (oder

Fig. 79.



besser verdeckt), ist um so frappanter, je näher derselbe dem Beobachter liegt Wir projiciren also die binocular einfach gesehenen Punkte in solchen Richtungen als ob unsere beiden Augen ein in der Mitte zwischen ihnen gelegenes Doppelauge wären. Helmholtz nennt das Doppelauge Hering's »Cyclopenauge« (Physiol Optik p. 611), und die Sehrichtung Hering's »die Richtungslinie des imaginären Cyclopenauges«, in welcher die Punkte des Netzhautbildes nach aussen projicirt werden.

Helmholtz (l. c. p. 612) hat nun einen Versuch angegeben, welcher Hering's Beobachtungen bestätigend zeigt, dass unsere Körperbewegungen diesen Sehrichtungen entsprechend ausgeführt werden, so lange wir unbefangen, wie gewöhnlich, sehen und nicht unsere Aufmerksamkeit absichtlich auf einen veränderten Zustand unserer Augen concentriren:

»Man blicke mit einem Auge nach einem entfernten Objecte und halte vor den unteren Theil des Gesichtes ein Blatt Papier so, dass man die eigenen Hände und Arme nicht sehen kann. Man schiebe dann den Zeigefinger der rechten Hand unter dem deckenden Schirme so in die Höhe, als wollte man nach dem gesehenen Gegenstande hinzeigen. Der Finger wird hinter dem Papier links von dem fixirten Gegenstande zum Vorschein kommen, wenn man mit dem rechten Auge hinblickt, rechts, wenn man mit dem linken sieht — umgekehrt ist der Erfolg, wenn das fixirte Object näher liegt, der Finger in grösserer Entfernung zum Vorschein kommt. — Beim gewöhnlichen Sehen schiebt man den Finger richtig ein zwischen Nasenwurzel und Object.« Helmholtz sagt dann weiter: »Wenn ich meine Aufmerksamkeit auf den Umstand concentrire, dass ich nur mit dem rechten Auge sehe und lebhaft an den Ort des rechten Auges im Kopfe denke, und dann den Finger vorschiebe, um das fixirte Object zu verdecken, so schiebe ich ihn wirklich in der richtigen Richtung vor«.

In gleicher Weise, wie die Bilder der fixirten Punkte, werden von uns aber auch alle Punkte projicirt, welche auf die beiden Gesichtspunkte (die Fusspunkte der Gesichtslinien auf der empfindenden Netzhautschicht, »Kernstellen« von Hering genannt) fallen, nämlich zu einem Punkte vereinigt und in der Sehrichtung projicirt nach dem Orte, wo sich die Gesichtslinien schneiden.

Blickt man bei parallelstehenden Gesichtslinien auf 2 um die Distanz der Augenmittelpunkte von einander entfernte Punkte auf einem Papierblatte, so dass sich also der linke Punkt auf dem Gesichtspunkte des linken Auges, der rechte auf dem Gesichtspunkte des rechten Auges abbildet, so werden die Netzhautbilder der beiden Punkte mitten hindurch zwischen den beiden Punkten auf dem Papier projicirt und zu einem Punkte in grösserer Ferne als der Entfernung des Papiers vereinigt — werden dagegen durch Convergenz der Gesichtslinien die Augen so gestellt, dass der linke Punkt sich auf dem rechten Gesichtspunkte, der rechte Punkt sich auf dem linken Gesichtspunkte abbildet, so werden die beiden Punkte in einen gemeinschaftlichen Punkt vor der Ebene des Papiers und in der Mitte zwischen den beiden Punkten vereinigt. In beiden Fällen bleibt die Sehrichtung dieselbe, als wenn wir einen Punkt auf dem Papier in der Mitte zwischen jenen beiden Punkten fixirt hätten — auch erscheint in allen 3 Fällen der Punkt, welcher auf die Gesichtspunkte fällt, einfach. Aber der einfach gesehene Punkt wird in sehr verschiedene Entfernung projicirt, im ersten Falle hinter, im zweiten in, im dritten vor die Ebene des Papiers.

Dieses letzte Moment hat Hering übersehen, oder wenigstens unterschätzt (s. Donders, Archiv f. Ophthalm. 1867, XIII. 1, p. 23 Anm. und 1871, XVII. 2,

p. 2 u. f.), DONDERS aber hat nachgewiesen, dass die *Entfernung*, in welche wir beim binocularen Sehen den fixirten oder einfach gesehenen Punkt projiciren, abhängig ist von der *Convergenz der Gesichtslinien*, wenn auch diese nicht der einzige Factor ist, welcher für die Beurtheilung der Entfernung in Betracht kommt (Archiv für Ophthalmologie XVII. 2, p. 23). Im Ganzen ist die Entfernung, in welche wir projiciren, bestimmt durch die *Convergenzwinkel unserer Gesichtslinien* oder *durch den Kreuzungspunkt der Richtungslinien, welcher mit dem fixirten Punkte zusammenfällt*. Wir werden erst in § 63 näher hierauf eingehen.

Dass wir das, was auf den Gesichtspunkten abgebildet wird, einfach sehen, dass diese Punkte identische Punkte sind, ist eine unzweifelhafte Thatsache, für welche es aber keine Erklärung giebt. (cf. AUBERT, Physiologie der Netzhaut p. 305. — HELMHOLTZ, Physiol. Optik p. 441, 762, 802.)

Ausser den Gesichtspunkten sind nun noch andere Stellen auf den beiden Netzhäuten vorhanden, deren Erregung an *eine* Stelle im Raume projicirt wird, d. h. identische Stellen. Wir werden davon in den nächsten Paragraphen handeln, bemerken indess schon hier, dass alles indirect Gesehene viel weniger massgebend ist für die Erfahrungen, welche wir über die Objecte machen, als das durch Fixation Erkannte, und beim gewöhnlichen Sehen auch die Localisation des indirect Gesehenen nur eine vorläufige, zur Controle durch directes Sehen anregende ist. Wir beachten die derartigen Wahrnehmungen erst aufmerksamer, wenn wir die für praktische Zwecke erforderliche Orientirung bei Seite lassen und unsere Empfindungen und Wahrnehmungen an und für sich studiren.

§ 61. *Identische und disparate Netzhautpunkte.* — Die Netzhautpunkte, deren Bilder in gleicher Weise wie die der Gesichtspunkte auf *einen* Ort im Raume projicirt werden, werden *identische* Punkte, oder *correspondirende* Punkte oder *Deckpunkte* genannt, diejenigen, bei welchen dies nicht der Fall ist, welche also auf differente Stellen im Raume projicirt werden, *disparate Punkte*. Wenn man einen Punkt, welcher in der Medianebene gelegen sein mag, fixirt, so erscheinen Punkte, welche vor oder hinter demselben in der Medianebene gelegen sind, doppelt, weil sie sich auf disparaten Stellen der beiden Netzhäute abbilden, oder wie man sagt in *Doppelbildern*. Und zwar bildet sich der nähere Punkt nach aussen oder lateralwärts von dem Gesichtspunkte, der entferntere Punkt medianwärts davon auf den Netzhäuten ab. In Folge davon verschwindet, wenn das linke Auge geschlossen wird, das linke Bild des entfernteren und das rechte Bild des näheren Punktes: darnach unterscheidet man *gleichnamige* und *ungleichnamige* Doppelbilder. Jedes der beiden Doppelbilder wird als *Halbbild* oder *Trugbild* von dem einfach erscheinenden Bilde, welches HELMHOLTZ Ganzbild nennt, unterschieden.

Man hat nun verschiedene Methoden angewendet, um die Lage der Deckpunkte auf den Netzhäuten zu ermitteln, 1) die Methode, durch Druck auf die Sklera an möglichst beschränkten Stellen zu ermitteln, von welchen Stellen der Netzhaut aus die Druckbilder (§ 48) auf ein und dieselbe Stelle des Gesichtsfeldes projicirt werden, oder in einen Punkt zusammenfallen. Diese von PURKINJE (Beobachtungen I. 1823, p. 142 u. 145), JOHANNES MÜLLER (Handbuch der Physiologie II. 1840, p. 377), später von PRÉVOST (Essai sur la théorie de la Vision

binoculaire. Genève 1843, p. 6), Meissner (Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1854, p. 72) u. A. angewendete Methode ist bei längerer Fortsetzung der Versuche sehr unbequem und angreifend für die Augen, übrigens in ihrer Anwendung beschränkt und in ihren Resultaten ungenau.

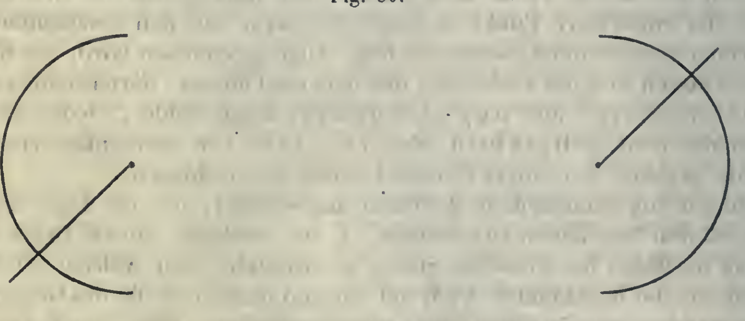
2) Die Methode Prévost's zu beobachten, unter welchen Bedingungen Doppelbilder von einfachen Objecten, Punkten oder Linien gesehen werden und unter welchen Bedingungen die Objecte einfach erscheinen. Diese vielfach angewendete Methode ist viel bequemer und zuverlässiger, setzt aber voraus, dass der Beobachter sicher fixiren, das indirect Gesehene mit Aufmerksamkeit beachten, das Verschmelzen der Doppelbilder leicht bemerken kann, dass er die gewohnheitsmässige Virtuosität im Vernachlässigen eines der Doppelbilder überwunden hat, und dass feine, mit dem Hintergrunde oder der Umgebung gut contrastirende Objecte gewählt werden.

3) Die von Meissner (l. c. p. 15) zuerst benutzte Methode, Doppelbilder von Linien durch Fixiren eines vor denselben gelegenen Punktes zu erzeugen und den Parallelismus oder das Convergiren der Doppelbilder zu beobachten, welche manche Vortheile hat, ist in ihrer Anwendung ziemlich beschränkt, da sie nur für Nahestellungen der Augen benutzt werden kann, und giebt keine ganz zuverlässigen Resultate, wie Hering (Beiträge 1863, p. 211 u. f.) nachweist.

4) Die Methode v. Recklinghausen's (Arch. f. Ophthalm. 1859, V. 2, p. 129), die Kreuzungsbilder von indirect gesehenen Linien, welche auf der Fläche, in welcher der fixirte Punkt liegt, verschoben werden können, in Bezug auf die Veränderung des Kreuzungswinkels zu beobachten, wenn abwechselnd die äusseren und die inneren Netzhauthälften mittelst eines Schirmes verdeckt werden, giebt für einen dem Fixationspunkte nahen Bezirk genaue Resultate.

5) Die Methode Hering's (Beiträge III. 1863, p. 177), bei Parallelstellung der Gesichtslinien 2 Punkte, welche in der Distanz der Augenmittelpunkte von einander auf einer senkrecht stehenden Tafel angebracht sind, in der Projection zu vereinigen, und zu beobachten, ob Linien, welche von den Punkten aus in entgegengesetzter Richtung (z. B. für das linke Auge nach unten links, für das rechte Auge nach oben rechts) gezogen sind, zu einer gleichmässigen geraden, oder zu

Fig. 80.

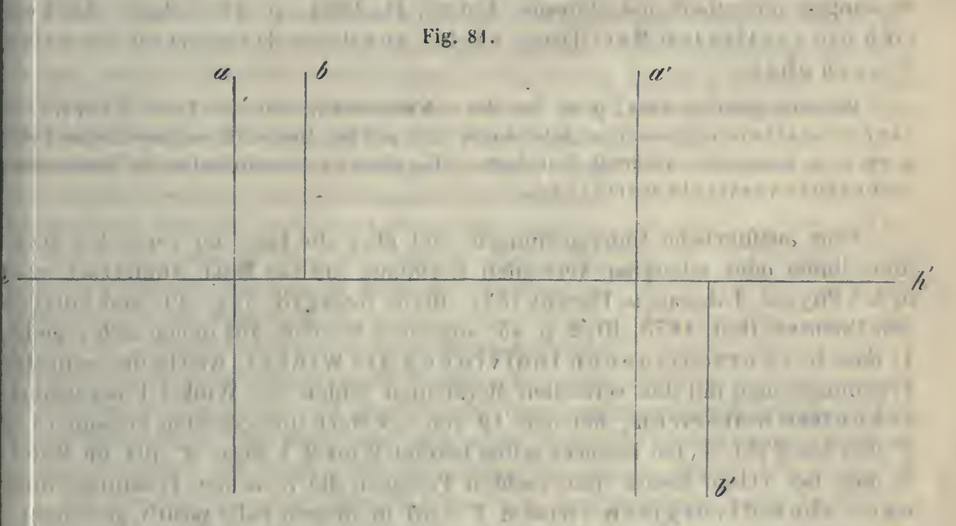


einer geknickten Linie zusammenstossen — oder auch Halbkreise um die zusammenfallenden Punkte zu schlagen, wie in Figur 80, und zu beobachten, ob

dieselben einen geschlossenen Kreis bilden. (cf. Volkmann, Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik II. 1864, p. 236.)

6) Eine Methode von Volkmann (ebendaselbst p. 199), bei welcher gleichfalls 2 Punkte bei Parallelstellung der Gesichtslinien zur Vereinigung gebracht werden, und den durch die Punkte gezogenen Linien eine Richtung gegeben wird (durch Drehung derselben um die Punkte), bei welcher sie einfach erscheinen, oder sie nach Meissner's Methode bei minimaler Convergenz der Augenaxen parallel erscheinen zu sehen und dann den Winkel abzulesen, um welchen die Linien gegen einander geneigt sind. Eine Modification dieser Methode hat Volkmann in der Art gemacht, dass eine Horizontallinie hh' Figur 81 von 2 Senkrechten aa' geschnitten wird, deren gegenseitige Distanz der Entfernung der parallelen Augenaxen entspricht. Von den beiden Halblinien b und b' ist b fest, b' verschiebbar in horizontaler Richtung: die Aufgabe für den Beobachter ist, b' so zu stellen, dass wenn a und a' zusammenfallen, auch der obere Punkt von b' mit dem unteren Punkte von b zusammentrifft. Der Apparat kann um 90° gedreht werden, so dass hh' vertical wird. (cf. Helmholtz, Physiol. Optik p. 701 und 705.)

Fig. 81.



Endlich ist noch 7) eine Methode von Hering (Beiträge p. 182) anzuführen, bei welcher man in dem einen, z. B. linken Auge, welches den Mittelpunkt eines gegen den Grund lebhaft contrastirenden Kreises fixirt, ein Nachbild dieses Kreises erzeugt, dann das Auge schliesst und mit dem rechten Auge einen Punkt auf mattem schwarzen Papier, um welchen herum Marken eines dem erstbenutzten gleichen Kreises angebracht sind, fixirt: das Nachbild deckt dann die Marken des Kreises bei bestimmter Augenstellung. — Ueber den Donders'schen Apparat, das Isoscop, sind die nothwendigsten Angaben in § 70 zu Ende gemacht worden.

In Bezug auf die Lage der identischen Punkte oder der Deckpunkte auf den Netzhäuten hat sich nun Folgendes ergeben:

Im Allgemeinen sind Deckstellen der Netzhäute diejenigen Stellen, welche sich decken, wenn man die beiden Netzhäute so über einander gelegt denkt, dass ihre horizontalen und verticalen

Meridiane zusammenfallen — oder das, »was von der Mitte der Retina in gleicher Richtung gleich weit entfernt ist.« Dieser Satz ist schon von Johannes Müller (Handbuch der Physiologie 1840, p. 378) aufgestellt worden und hat sich bei den sehr genauen Messungen Volkmann's nach Methode C (Physiol. Unters. p. 233) bewährt gefunden — nur ist in Bezug auf die Identität der horizontalen und verticalen Meridiane der Satz zu modificiren. Nach Hering (Beiträge 1863 [April] p. 175), Helmholtz (Verhandlungen des Heidelberger medicinisch-naturhistorischen Vereins vom 3. Mai 1863 und Arch. f. Ophthalm. 1863, IX. 2, p. 189), Volkmann (Berliner Akademie-Berichte 13. August 1863, p. 394), welcher letztere bald darauf grosse Reihen genauer Messungen mitgetheilt hat (Physiol. Unters. II. 1864, p. 119—240), decken sich die verticalen Meridiane nicht, sondern divergiren um etwa 2° nach oben.

Meissner (Beiträge 1854, p. 24) hat die sich deckenden verticalen Linien »verticale Trennungslinien« genannt, auch Volkmann (l. c. p. 198), Hering (Binoculares Sehen 1868, p. 88) u. A. haben den Ausdruck beibehalten; Helmholtz gebraucht dafür die Bezeichnung »scheinbar verticale Meridiane«. —

Sehr ausführliche Untersuchungen sind über die Lage der verticalen Trennungslinien oder scheinbar verticalen Meridiane von van Moll (Onderzoekingen in het Physiol. Laborat. te Utrecht 1874, Derde Reeks III. 1, p. 39) und kürzlich von Donders (ibid. 1875, III. 2, p. 45) angestellt worden, aus denen sich ergiebt, 1) dass bei verschiedenen Individuen die Winkel, welche die verticalen Trennungslinien mit den verticalen Meridianen bilden (als Winkel *V* bezeichnet) erheblich differiren, bei den 19 von van Moll untersuchten Personen von 0°,093 bis 2°,51 — bei Donders selbst beträgt Winkel *V* sogar 3°,304 im Mittel; 2) dass bei allen bisher untersuchten Personen die verticalen Trennungslinien nach oben divergiren (Winkel *V* wird in diesem Falle positiv gerechnet); 3) aus Donders' Bestimmungen mittelst des Isoscops (s. § 70 zu Ende) hat sich ferner die wichtige Thatsache ergeben, dass die Lage der verticalen Trennungslinien oder der Winkel *V* bei ein und demselben Individuum und genau derselben Augenstellung nicht constant ist, vielmehr verschieden gefunden wird *a*) an verschiedenen Tagen, sich ferner verändert *b*) im Laufe eines und desselben Tages, *c*) in Folge von vorhergehenden Bestimmungen, *d*) in Folge einer längeren oder kürzeren Dauer für die Einstellung der beobachteten Linien, *e*) unter dem Einflusse von Neigung der beobachteten Linien, *f*) unter dem Einflusse gleichzeitig vorhandener horizontaler oder geneigter Linien. — Das Minimum in allen Donders'schen Bestimmungen beträgt für Winkel *V* bei ihm selbst 2°,6, das Maximum 4°,85.

Diese Beobachtungen von Donders sind von fundamentaler Wichtigkeit für die Bestimmungen der Lage der Trennungslinien bei verschiedenen Stellungen und bei Bewegungen der Augen (s. § 72 und 73).

Auch für die horizontalen Meridiane hat Volkmann eine kleine Divergenz von etwa 0°,5 gefunden, in entgegengesetztem Sinne, wie bei den verticalen Meridianen. — Auch van Moll und Donders haben die Divergenzen der horizontalen Trennungslinien bestimmt.

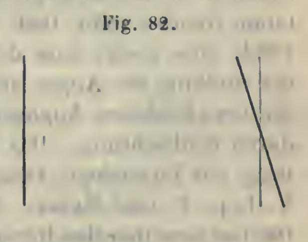
Mit Berücksichtigung dieser Bestimmungen drückt nun HELMHOLTZ den Müller-schen Satz von den identischen Punkten folgendermassen aus:

Deckpunkte sind diejenigen Punkte beider Sehfelder, welche gleiche und gleich gerichtete Abstände von den scheinbar horizontalen und scheinbar verticalen Decklinien haben.

Alle Punkte nun, welche wirklich binocular gesehen werden und nicht auf Deckpunkte fallen, werden doppelt gesehen, wenn sie in eine auf den Gesichtslinien oder auf der Visirebene senkrechte Ebene projicirt werden — was beim gewöhnlichen Sehen aber nur der Fall ist, wenn sie ziemlich weit entfernt von Deckpunkten liegen. Wir kommen darauf in § 63 zurück.

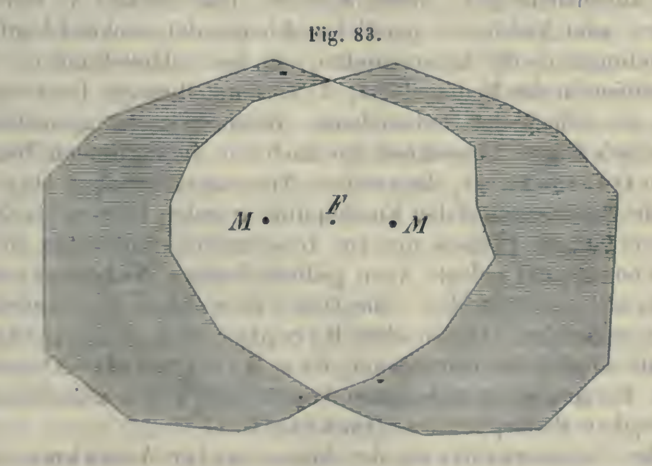
Der Versuch, durch welchen WHEATSTONE (Poggendorff's Annalen 1842, Ergänzungsband p. 30) nachweisen zu können glaubte, dass mit correspondirenden Stellen doppelt gesehen werden könnte, hat durch HERING's Analyse (Beiträge 1862, II. p. 81 u. f.) alle Beweiskraft verloren. Der Versuch besteht darin, dass im Stereoscop dem linken Auge das Bild einer starken verticalen Linie, dem rechten Auge das Bild einer schwachen verticalen und einer starken die Verticale unter einem Winkel von etwa 10° durchkreuzenden starken Linie, wie in Figur 82 geboten wird: bei nicht besonders aufmerksamer Beobachtung fallen im Sammelbilde die beiden starken, nicht die beiden verticalen Linien zusammen, und die schwache Linie erscheint geneigt von vorn nach hinten. Bei aufmerksamer Beobachtung und Bezeichnung der zusammenfallenden Linien durch besondere Marken überzeugt man sich aber, dass die beiden verticalen Linien zusammenfallen. (cf. AUBERT, Physiologie der Netzhaut p. 321.)

Fig. 82.



Ich bemerke übrigens, dass der Theil des Gesichtsfeldes, eines Auges, mit welchem binocular gesehen wird, kleiner ist, als der Theil, mit welchem nur

Fig. 83.



monocular gesehen werden kann. MÖSER (Das Perimeter und seine Anwendung. Inaug. Diss. Breslau 1869) hat unter FÖRSTER's Leitung die Begrenzung des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes ermittelt und eine Begrenzung desselben gefunden,

wie sie der weissgelassene Theil der Figur 83 wiedergiebt, während die schraffirten Flächen die monocularen Gesichtsfelder darstellen. *F* bedeutet den Fixationspunkt, *MM* die Mariotte'schen Flecke.

§ 62. Der Horopter. — Man hat nun denjenigen Bezirk des äusseren Raumes zu ermitteln gesucht, dessen Punkte sich auf identischen Stellen oder Deckstellen abbilden, und diesen Bezirk als Horopter bezeichnet. Aguilonius (Opticorum libri sex. Antwerpae 1613, s. Meissner, Beiträge 1854, p. 1), der den Namen erfand, glaubte, dass in einer durch den fixirten Punkt gelegten geraden, zu der Verbindungslinie der Augenmittelpunkte parallelen Linie das Einfachgesehene läge, — Vieth (Gilbert's Annalen der Physik 1818, Bd. 58, p. 233) und Johannes Müller (Physiologie des Gesichtssinnes 1826, p. 71) construirten den Horopter als eine Kreislinie, welche durch den fixirten Punkt und die Kreuzungspunkte der Richtungslinien ginge, ohne den Verticalhoropter zu construiren, was erst Prévost (Essai sur la théorie de la Vision binoculaire. Dissertation Genève 1843) that. Erst Meissner (Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1854) wies nach, dass der Horopter nicht etwas Constantes, sondern eine von der Stellung der Augen abhängige Begrenzung im Raume sei und suchte ihn für die verschiedenen Augenstellungen zu ermitteln theils durch Construction, theils durch Beobachtung. Das Problem des Horopters wurde dann von Hering (Beiträge zur Physiologie 1863, 3. Heft), Helmholtz (Archiv f. Ophthalmologie 1863, X. 1, p. 1) und Hankel (Poggendorff's Annalen 1863, Bd. 122, p. 575) gelöst. Die Construction des Horopters als des Inbegriffes derjenigen Punkte des Raumes, welche auf den experimentell ermittelten Deckstellen des Sehfeldes sich abbilden, ist eine rein mathematische Aufgabe. Den so gefundenen Horopter bezeichnet Hering als mathematischen Horopter im Gegensatze zu dem durch directe Versuche nachzuweisenden empirischen Horopter.

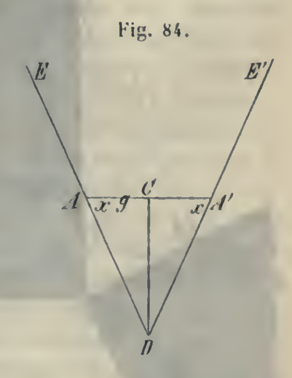
Die Construction des mathematischen Horopters ist auszuführen für die verschiedenen Augenstellungen, deren Meissner unterscheidet 1) Primärstellung: Gesichtslinien (oder Visirlinien) parallel und horizontal, senkrecht auf der Grundlinie (Verbindungslinie der Knotenpunkte); 2) Secundärstellungen: Convergenz der Gesichtslinien in der Medianebene; 3) Tertiärstellungen: Convergenz der Gesichtslinien, ausserhalb der Medianebene. Indem wir der geometrischen Construction Hering's folgen, bezeichnen wir nach ihm die horizontale Trennungslinie als mittlen Querschnitt, die verticale Trennungslinie als mittlen Längsschnitt, die durch sie und den Knotenpunkt gelegten Ebenen als Quer- und Längsebene; diese Ebenen um zur Gesichtslinie senkrechte in ihnen und durch den Knotenpunkt gelegte Axen gedreht heissen Nebenquerschnitte, bezw. Nebenlängsschnitte. Die Orte, in welchen die identischen Längsebenen sich schneiden, bilden den Horopter der Längsschnitte, die Schnittpunkte identischer Querebenen den Horopter der Querschnitte. Die beiden Horopteren gemeinsamen Punkte bilden den eigentlichen Horopter oder den Horopter der Deckstellen.

1) In der Primärstellung der Augen (unter Annahme verticaler Längsschnitte) schneiden sich alle Richtungslinien in unendlicher Ferne: der Horopter ist eine auf den Richtungslinien senkrechte, unendlich ferne Ebene.

Wenn, wie es meistens der Fall zu sein scheint, bei dieser Augenstellung

die verticalen Trennungslinien oder die mittlen Längsschnitte nicht parallel sind, sondern (um etwa 2°) nach oben divergiren — so convergiren je zwei identische Längsebenen nach unten und schneiden sich in einer der Visirebene (oder Blickebene) parallelen Ebene, deren Abstand von der Visirebene abhängt von dem Convergenzwinkel der mittlen Längsebenen. Der Abstand ist aber gleich der halben Grundlinie g, multiplicirt mit der Tangente des Neigungswinkels der mittlen Längsebene gegen die Visirebene x. Entsprechen in Figur 84 DE und DE' der Neigung der mittlen Längsebene, ist AA' die Grundlinie, AC also $= g$, und x der Neigungswinkel der mittlen Längsebene zur Visirebene oder Grundlinie, so ist $CD = g \cdot \tang x$. — Convergiren auch die Querebenen nach oben (oder unten), so schneiden sie sich in der Medianebene, welche den Horopter der Querschnitte darstellt. Längshoropter und Querhoropter schneiden sich dann in einer der Medianebene angehörigen und der Visirebene parallelen Linie, deren Abstand von der Visirebene nach unten $= g \cdot \tang x$ ist, und den Horopter der Deckstellen bildet.

Fig. 84.



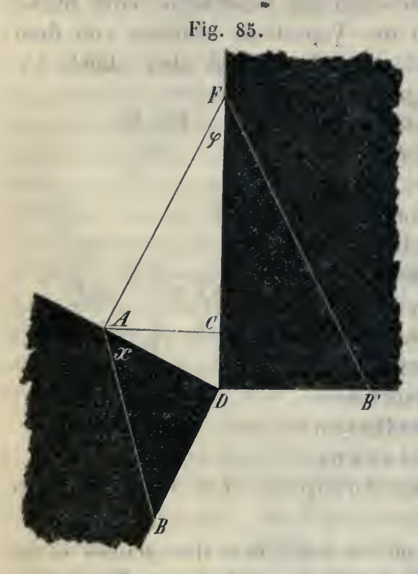
Nach HELMHOLTZ (Physiol. Optik p. 715) würde für ihn selbst diese Horopterlinie in die Fussbodenfläche fallen, für andere Beobachter auch ungefähr — nach den von HERING (Beiträge V. 1864, p. 348) der Berechnung zu Grunde gelegten Werthen würde der Horopter mehr oder weniger tief unterhalb der Fussbodenfläche liegen. Auf die Bedeutung dieser Lage des Horopters kommen wir noch zurück.

2) Secundärstellung mit Convergenz der Gesichtslinien in der Medianebene. Bei senkrechter Lage der Längsschnitte zur Visir- oder Blickebene schneiden sich je 2 identische Längsebenen in einer zur Blickebene verticalen Linie: die Durchschnittsstellen bilden einen Cylindermantel, welcher die Blickebene senkrecht durchschneidet in einem durch den fixirten Punkt und die Knotenpunkte gehenden Kreise. Der Horopter der Querschnitte wird gebildet durch die Blickebene, in welcher die mittlen Querschnittsebenen zusammenfallen und durch die Medianebene, in welcher sich die übrigen Nebenquerschnittsebenen schneiden. Wo der Cylindermantel der Längsschnitte von der Blickebene und Medianebene (dem Horopter der Querschnitte) geschnitten wird, da liegt der Horopter der Deckstellen, welcher also einen Kreis (JOHANNES MÜLLER's Horopter) und eine verticale Gerade (PRÉVOST), welche durch den Fixationspunkt geht, bildet.

Convergiren bei dieser Blickrichtung die verticalen Trennungslinien oder mittlen Längsschnitte nach unten, so schneiden sich die entsprechenden Längsebenen in einer zur Blickebene geneigten Geraden, und die Gesammtheit der Durchschnittslinien bildet den Mantel eines schiefen Kegels, welcher die Blickebene in einem durch den Fixationspunkt und die Knotenpunkte gehenden Kreise durchschneidet, und dessen Spitze in der Medianebene senkrecht unter dem hintern Durchschnittspunkte dieses Kreises und der Medianebene gelegen ist. Die Entfernung der Kegelspitze von diesem Punkte ist abhängig von der Länge der Grundlinie, dem Convergenzwinkel der Gesichtslinien und dem Neigungs-

winkel der mittlen Längsschnitte (verticalen Trennungslinien). Bezeichnen wir wieder mit g die halbe Grundlinie, mit x den Neigungswinkel der mittlen Längsschnitte zur Blickebene und mit 2φ den Convergenzwinkel der Gesichtslinien, so ist der Verticalabstand der Kegelspitze von der Blickebene $= \frac{g \cdot \text{tang}\, x}{\cos \varphi}$.

Fig. 85.



Es sei in Figur 85 F der Fixationspunkt, A der Knotenpunkt des linken Auges, C der Mittelpunkt der Grundlinie, DF die Medianlinie, $\angle AFC$ der halbe Convergenzwinkel $= \varphi$ und die Ebene des Papiers die Blickebene. Die schwarzen Flächen denke man sich senkrecht zur Blickebene aufgerichtet, so dass B und B' in einen Punkt, welcher über D gelegen ist, zusammenfallen; AB ist dann die Axe der Längsebene, und $\angle DAB = x$ der Neigungswinkel des mittlen Längsschnittes zur Blickebene, $B'F$ die Durchschnittslinie der mittlen Längsebenen, und der Neigungswinkel derselben zur Medianlinie $\angle B'FD$ sei $= n$.

Dann ist $DF = \frac{DA}{\sin \varphi}$, $DB = DA \cdot \text{tang}\, x$
und da $DB = DB'$, DB' aber $= DF \cdot \text{tang}\, n$,
so ist $\frac{DB'}{DF} = \frac{DA \cdot \text{tang}\, x}{\frac{DA}{\sin \varphi}} = \text{tang}\, x \cdot \sin \varphi$.

DB aber ist der Verticalabstand der Kegelspitze von der Blickebene; nun
ist $DA = \frac{AC}{\cos \varphi}$ (da $\angle DAC = \angle AFC = \varphi$)
und da $BD = DA \cdot \text{tang}\, x$,
so ist $BD = \frac{AC \cdot \text{tang}\, x}{\cos \varphi}$, und da $AC = g$,
so ist der Verticalabstand der Kegelspitze $BD = \frac{g \cdot \text{tang}\, x}{\cos \varphi}$.

Der Horopter der Querschnitte liegt in der Medianebene oder fällt mit derselben zusammen, indem je 2 identische Querebenen sich in einer in der Medianebene liegenden, zur Blickebene verschieden geneigten Geraden schneiden. Diese schneidet den Kegelmantel der Längsschnitte in einer zur Blickebene unter einem Winkel geneigten Geraden, dessen Tangente $= \sin \varphi \cdot \text{tang}\, x$ ist. In Figur 85 ist dies der Winkel $DFB' = n$, dessen Tangente $= \frac{B'D}{DF}$. Nun ist $\frac{AD}{DF} = \sin \varphi$, $\frac{BD}{AD} = \frac{B'D}{AD} = \text{tang}\, x$, folglich $\frac{B'D}{DF} = \sin \varphi \cdot \text{tang}\, x$, folglich $\text{tang}\, n = \sin \varphi \cdot \text{tang}\, x$. Diese Linie, der Horopter der Deckpunkte ist mit dem oberen Ende von der Antlitzfläche weggeneigt, wenn die Trennungslinien nach unten convergiren.

3) Bei unsymmetrischen Convergenzstellungen, wenn der fixirte Punkt nicht in der Medianebene liegt, wird bei den dann noch stärker convergirenden und

ungleich geneigten Trennungslinien sowohl der Horopter der Längsschnitte als der der Querschnitte eine Curve höherer Ordnung und ihr Durchschnitt eine im Raume gewundene Linie, wegen deren Construction wir auf die genannten Abhandlungen verweisen.

Eine weitere Verfolgung des Horopterproblems unterlasse ich, da dieselbe weder ein physiologisches, noch ein ophthalmologisches Interesse hat. Der Satz, den v. Recklinghausen (Arch. f. Ophthalm. 1859, V. 2, p. 146) aufgestellt hat: »der Horopter als Inbegriff sämmtlicher einfach wahrgenommener Punkte des Raumes scheint mir sehr unwesentlich zu sein«, ist noch nicht widerlegt. Im Sinne von v. Recklinghausen ist zu berücksichtigen, dass der Bereich des deutlichen und scharfen Sehens ein sehr kleiner ist, dass die Distinctionsfähigkeit von der *Fovea centralis* her schneller abnimmt, als die Distanz der Doppelbilder in vielen Fällen zunimmt — dass wir ferner eine grosse Virtuosität in der Vernachlässigung der Doppelbilder haben, — dass ausserdem die Form des Horopters bei der fast ununterbrochenen Veränderung unserer Augenstellung und Kopfhaltung immerfort wechseln muss, und dass, da wir uns dieser Veränderungen nicht oder nur sehr unvollkommen bewusst werden, daraus eher eine Verwirrung als eine Verbesserung der Orientirung beim Sehen hervorgehen muss.

Nur eine Beziehung der Form des Horopters für das Sehen hat Helmholtz (Arch. f. Ophthalm. 1864, X. 1, p. 33 und Physiol. Optik p. 725) zu finden geglaubt, nämlich die richtigere Projection der Fussbodenfläche und die feinere Unterscheidung des Reliefs auf derselben. Für die Kenntniss der Lage oder Neigung der Fussbodenfläche kann die Lage der Horopterlinie wohl kaum in Betracht kommen: dass die Projection der Fussbodenfläche sich ändert, wenn man den Kopf stark nach einer Seite neigt, oder zwischen den Beinen hindurch sieht, oder auf dem Kopfe steht, oder die Fussbodenfläche durch Spiegelung in rechtwinkligen Prismen um 180° gedreht sieht, hat seinen Grund wohl darin, dass wir geneigt sind, alles auf der Netzhaut oberhalb der *Fovea centralis* Gelegene näher, das unterhalb derselben Gelegene ferner zu sehen (Förster, Jahresbericht der Schlesischen Gesellschaft 1859, p. 113 und Ophthalmologische Beiträge 1862, p. 86 — Hering, Beiträge V. 1864, p. 355). Auch für mich ist es gleich, ob ich unter diesen Bedingungen ein Auge schliesse, oder mit beiden Augen sehe. — Anderseits wird aber das Relief oder die relativen Entfernungen der Unebenheiten der Fussbodenfläche genauer erkannt werden können, wenn dieselbe in der Nähe des Horopters liegt, denn die Erkenntniss der Tiefendimension ist von der Genauigkeit abhängig, mit welcher wir im Stande sind, die Punkte im Raume einfach zu sehen. Ich finde auch in der That, dass für die Sicherheit, oder eigentlich die Unbekümmertheit beim Gehen von sehr merklichem Einflusse ist, ob ich nur mit einem oder mit beiden Augen sehe, ob ich mit gewöhnlicher Kopfhaltung oder mit stark nach hinten geneigtem Kopfe gehe.

An Versuchen, welche die Bedeutung des Horopters beim Sehen in einer den theoretischen Constructionen und Berechnungen desselben adäquaten Exactheit nachwiesen, fehlt es bis jetzt.

§ 63. Wahrnehmung der Entfernung und der Tiefendimension. — Wenn wir unsere Empfindungen nach aussen in den Raum setzen, so

ist damit zugleich gesagt, dass wir sie in irgend eine Entfernung projiciren. Wi haben schon in § 59 und § 60 darauf hingewiesen, dass die Entfernung beim monocularen Sehen ziemlich unsicher beurtheilt wird, dass wir aber beim binocularen Sehen die Objecte in dem Kreuzungspunkte der Gesichtslinien sehen Man bezeichnet die Entfernung eines Objectes von dem Beobachter als die absolute Entfernung desselben und unterscheidet davon die relative Entfernung, worunter man die Entfernung, welche Punkte in der dritten Dimension von einander haben, versteht; gehören diese Punkte ein und demselben Objecte an, so braucht man dafür den Ausdruck »Tiefendimension« des Objectes oder des Körpers. — Man versteht ferner unter der Beurtheilung der Entfernung oder Wahrnehmung der Entfernung das Verhältniss der Entfernung, in welche wir unsere Empfindungen projiciren zu der sogenannten wirklichen Entfernung des Objectes, d. h. der Entfernung, welche wir durch sämmtliche uns zu Gebote stehenden Erfahrungen ermitteln.

In Bezug auf die absolute Entfernung, in welche wir unsere Empfindungen projiciren, lässt sich nachweisen, dass dieselbe in erster Linie abhängig ist von der Convergenz unserer Gesichtslinien. Wir können, worauf schon Lehot (Fechner, Repertorium für Physik 1832, p. 229) aufmerksam gemacht hat, ein Nachbild, z. B. von der Sonne in eine grössere oder geringere Entfernung projiciren, und es demgemäss grösser oder kleiner sehen, je nachdem wir unsere Augenaxen oder Gesichtslinien wenig oder stark convergiren lassen. Hermann Meyer in Zürich (Archiv für physiologische Heilkunde 1842, I. p. 316) hat folgenden sehr einfachen Versuch angegeben: blickt man durch das Geflecht eines Rohrstuhles nach dem Fenster, so erscheinen die Maschen entfernt in der Nähe des Fensters und sehr gross, blickt man auf eine in der Gegend des Nahepunktes vor dem Rohrstuhle gehaltene Bleistiftspitze, so erscheinen die Maschen des Rohrstuhles nahe und klein, nämlich in der Ebene des fixirten Punktes oder des Punktes, in welchem die Gesichtslinien sich schneiden. Obgleich der Versuch auch beim Sehen mit einem Auge dasselbe Resultat giebt, so fühlt man dabei doch gleich deutlich, dass die Augen beim Fixiren des nahen Objectes stärker convergiren. Dass bei geschlossenem einen Auge doch die der Entfernung adäquate Convergenzstellung angenommen wird, hat auch Donders (A. f. Ophthalm. 1871, XVII. 2, p. 24) nachgewiesen. Am sichersten geht dies aus den Convergenzbewegungen künstlicher oder erblindeter Augen hervor. Hermann Meyer (Poggendorff's Annalen 1852, Bd. 85, p. 198) hat nachgewiesen, dass Objecte bei Convergenz der Gesichtslinien näher erscheinen bei Ausschluss der Accommodation: werden in einem Wheatstone'schen Spiegelstereoscop (s. § 64) die Zeichnungen den Spiegeln ferner gerückt, wobei die Spiegelbilder für die beiden Augen ferner rücken, so erscheint das Sammelbild näher und kleiner und die Augenaxen convergiren stärker. Noch einfacher lässt sich der Versuch machen, wenn man ein Paar Stereoscopbilder auseinander schneidet und dieselben durch Convergenz der Gesichtslinien zum Sammelbilde vereinigt (§ 64): das Sammelbild rückt näher, als die Ebene der Bilder ist, für die man gleichwohl accommodirt bleibt. Je weiter man nun die beiden Bilder von einander fortschiebt, um so näher rückt das in der Luft schwebende Sammelbild. Statt der Stereoscopbilder kann man auch Münzen, Briefmarken und dergleichen benutzen, welche, auf dem Tische um die doppelte Distanz der Augenmittelpunkte von ein-

ander entfernt liegend, förmlich in die Höhe zu springen scheinen (Donders), wenn man sie durch Convergenz der Gesichtslinien zum Sammelbilde vereinigt.

Noch frappanter ist die Annäherung, wenn man auf einen gleichmässigen Grund ein Paar Briefmarken in 200 Mm. Distanz von einander aufklebt, und aus etwa 500 Mm. Distanz zum Sammelbilde vereinigt: es erscheint dann eine Briefmarke in der Luft schwebend und erheblich kleiner und dieses Luftbild scheint nachzuschweben, wenn man sich von den Objecten entfernt und von dem Beobachter fortzuschweben, wenn man sich nähert. Bei grösserer Annäherung als 500 Mm. wird die Convergenz anstrengend und es kann durch secundäre Urtheilstäuschung, indem die Grösse des Sammelbildes massgebend wird, Projection in grosse Entfernung eintreten, bei mir namentlich, wenn ich die angestrengte Convergenz einige Zeit gewaltsam festhalte. Ein Anderer kann dabei die Convergenzen der Augen des Beobachters sehr deutlich controliren.

Donders (Archiv für Ophthalm. 1871, XVII. 2, p. 16) hat nun nachgewiesen, dass wir nach der erforderlichen Convergenz unserer Gesichtslinien über die Entfernung urtheilen, und zwar sehr genau, und dass wir demgemäss unsere Bewegungen dirigiren. Bei Ausschluss aller die Orientirung begünstigenden Momente wird ein leuchtender Punkt, der sich in einer gewissen Entfernung von den Augen befindet, in richtige Entfernung projicirt und mit dem Finger bis auf etwa 3% Differenz im Mittel sicher getroffen.

Donders' Versuche waren folgendermassen angeordnet: Der Beobachter befindet sich in einem völlig dunklen Kasten, bei fixirtem Kopfe, und sieht nach einem durch sehr kleine Inductionsfunken hervorgebrachten leuchtenden Punkte: er hat die Aufgabe, mit seinem mit Kautschuck bekleideten Zeigefinger der rechten Hand den Funken zu treffen. Unmittelbar nach der ausgeführten Bewegung wird das Tageslicht zugelassen und der Abstand der Fingerspitze von dem Lichtpunkte gemessen. Die Entfernung des Lichtpunktes von den Augen variirte zwischen 65 Mm. und 610 Mm., ausserdem variirte die Intensität der Inductionsfunken, indem die Rolle verschoben wurde. In verschiedenem Sinne wurde die Entfernung unrichtig geschätzt und zwar in 31 Bestimmungen 20 Mal zu gross, 9 Mal zu klein und 2 Mal ohne Fehler; die mittlere Fehlweisung betrug für die 20 Bestimmungen 12,4 Mm. oder 4,2%, für die 9 Bestimmungen 10,8 Mm. = 2,4%. Dass die Fehlweisung nicht allein auf Rechnung des Sehens, sondern auch auf Rechnung der Bewegung des Fingers und wohl überwiegend auf diese zu setzen ist, scheint aus Versuchen geschlossen werden zu müssen, in welchen bei offenem beleuchtetem Kasten die Elektroden gesehen, dann die Augen geschlossen werden, und nun wieder mit dem Finger der Punkt zwischen den Elektroden getroffen werden soll. Die Fehlweisung beträgt auch hier im Mittel 10,7 Mm.; unter 21 Fällen ist der Finger 15 Mal zu weit, 5 Mal zu nah, 1 Mal richtig eingestellt worden. — In diesen Versuchen ist allerdings der Einfluss der Accommodation nicht ausgeschlossen; nach den in § 59 angegebenen Versuchen von Wundt ist derselben wohl kein erheblicher Einfluss auf die Donders'schen Bestimmungen zuzuschreiben.

Wenn wir nun als festgestellt ansehen, dass wir die Entfernung eines Punktes nach der Convergenz unserer Gesichtslinien beurtheilen, so ist damit das Problem der Wahrnehmung der absoluten Entfernung noch keineswegs gelöst, vielmehr ist nun die weitere Frage: auf welche Weise erhalten wir die genaue Kenntniss von der jedesmaligen Convergenzstellung? Von unserm Muskelgefühl, d. h. von dem Grade der Zusammenziehung unserer Muskeln haben wir nur eine ziemlich unbestimmte Kenntniss und erhalten durch dasselbe jedenfalls keinen directen Aufschluss über die Augenstellung, noch über die Grösse und Richtung der Bewegung. (Volkmann, Physiologische Untersuchungen 1864,

II. p. 188.) Man nimmt aber an (Förster, Ophthalmologische Beiträge 1862 p. 75 Anm. — Hering, Archiv für Ophthalm. 1868, XIV. 1, p. 10. — Donders Arch. f. Ophthalm. 1871, XVII. 2, p. 13), dass das Bewusstsein von der Bewegungsinnervation, d. h. von dem Impulse, welchen wir unseren Bewegungsorganen zukommen lassen, massgebend ist für die Localisation des Wahrgenommenen, und Donders bezeichnet diese Bewegungsinnervation in Bezug auf die Wahrnehmung der Entfernung als Entfernungsinnervation (l. c. p. 16). Diese Innervation muss aber selbst offenbar ein πρότερον haben, und wir werden uns vorstellen können, dass dieselbe in allernächster Beziehung zu Empfindungen und Vorstellungen steht, welche uns zu Convergenz- oder Divergenzbewegungen veranlassen, so dass also, wie Hering (Beiträge 1864, V. p. 344) betont, die Bewegungen der Convergenz erst die Folge jener Empfindungen oder Vorstellungen sind. Donders drückt dies so aus: »nach dem Urtheile über die Entfernung regeln wir umgekehrt die Bewegungsinnervation.« Er führt verschiedene Versuche an, in denen bei geschlossenen Augen die Vorstellung von dem Orte eines Objectes erregt wird, und dann bei der Oeffnung dieselben auf diesen Ort eingestellt sind. (cf. Helmholtz, Physiol. Optik p. 613.) Wenn wir eine Summe von irgendwie gemachten Erfahrungen von Vorstellungen über Entfernungen voraussetzen, so werden wir allenfalls einen Ausgangspunkt für unsere Bewegungsinnervationen gewinnen und uns dabei beruhigen können, dass der Erfolg unserer Bewegungen immerfort wieder von Empfindungen und Wahrnehmungen controlirt wird. Ich muss aber doch hervorheben, dass wir dann gänzlich darauf verzichten zu erklären, wie wir zu Erfahrungen oder zu der ersten Vorstellung einer Entfernung kommen. Ich muss zweitens hervorheben, dass das Wort Bewegungsinnervation an Klarheit fast auf gleicher Stufe steht, wie das Wort Muskelgefühl, und nur eine Umschreibung der Thatsache ist, dass wir unsere beweglichen und empfindlichen Körpertheile unsern Zwecken gemäss bewegen. Der eingeschlagene Weg ist gewiss der richtige, aber die »Bewegungsinnervation« kann nur den Werth einer vorläufigen Bezeichnung der Richtung, welche die Untersuchung zu nehmen hat, beanspruchen, sie ist an sich eine fast unbekannte, für sich zu erforschende Grösse. — Wenn Hering (Beiträge V. p. 324 u. 345) zur Erklärung dieses Problems besondere »Tiefengefühle«, oder überhaupt einfache Raumgefühle für die Höhen-, Breiten- und Tiefenwerthe den einzelnen Netzhautstellen beilegt, so ist auch dies, wie Donders (Arch. f. Ophthalm. 1867, XIII. 1, p. 42 Anm.) sagt, nur eine Umschreibung der Thatsachen, aber keine Erklärung. — Meiner Ansicht nach ist die oben gestellte Frage, wodurch wir Kenntniss von unseren jeweiligen Convergenzstellungen erhalten, noch nicht beantwortet.

Was von der Wahrnehmung der absoluten Entfernung gilt, wird auch mutatis mutandis Anwendung finden auf die Wahrnehmung der relativen Entfernung, d. h. der verschiedenen Entfernung zweier oder mehrerer Punkte von einander. Wir können zunächst mit grosser Sicherheit aus den Convergenzbewegungen, die wir für Punkte in verschiedener Entfernung machen müssen, erkennen, ob ein Punkt vor oder hinter dem andern, ob er weit oder nur wenig entfernt ist von dem andern; wir benutzen in der That beim gewöhnlichen Sehen die Convergenzbewegungen, um uns über die Entfernung von Punkten in der dritten Dimension oder über die Tiefendimension zu unterrichten. Wenn sich eine horizontale Linie in der Medianlinie befindet, so lassen wir die Gesichtslinien

ich in allen ihren Punkten kreuzen und dasselbe geschieht bei vielen in der dritten Dimension ausgedehnten Objecten, d. h. bei Körpern. Brücke (Müller's Archiv 1841, p. 459) hat schon den Einfluss der Augenbewegungen für die Wahrnehmung der Tiefendimension hervorgehoben — indess allerdings auch überschätzt. Es ist nämlich von Dove (Berliner Akademie-Berichte 1841, p. 252 — Farbenlehre 1853, p. 153) und später von vielen Andern, von Volkmann (Handwörterbuch der Physiologie 1846, III. 1, p. 349), v. Recklinghausen (Poggendorff's Annalen 1859, Bd. 110, p. 81), Panum (Das Sehen mit zwei Augen 1858, p. 53 und andern Stellen), Aubert (Physiol. der Netzhaut 1864, p. 315), Donders (Archiv f. Ophthalm. 1867, XIII. 1, p. 36) festgestellt worden, dass bei Ausschluss aller Augenbewegungen, nämlich beim Ueberspringen eines elektrischen Funkens die Tiefendimension sicher erkannt wird, und zwar für die allereinfachsten Objecte.

Ich habe in meiner Physiologie der Netzhaut Versuche mitgetheilt, in denen vor einem gleichmässig weissen Schirme ein in der Tiefendimension ausgespannter dünner schwarzer Faden in seiner Neigung richtig erkannt wurde beim ersten Funken, welcher übersprang — ferner Versuche, in denen im Stereoscop dem einen Auge eine schwarze verticale Linie auf weissem Papier, dem andern Auge eine um 10° gegen das Loth geneigte sonst gleiche Linie geboten wurde, und jedesmal beim Ueberspringen des Funkens eine gegen die Ebene des Papiers in bestimmter Weise geneigte Linie (merkwürdigerweise niemals zwei gekreuzte Linien) gesehen wurde. Um in diesen Versuchen beim Ueberspringen des Funkens die Augen in passender Convergenzstellung und Accommodation zu haben, wurden die zum Sammelbilde zu vereinigenden Projectionen in ihrem Mittelpunkte (dem zu fixirenden Punkte) mit einer feinen Nadel durchstochen und auf eine von unten sehr schwach beleuchtete Glasplatte gelegt. — Donders hat später die Versuche in gleicher Weise angestellt und ein gleiches Resultat erhalten.

Es können also durch die Anordnung der Punkte in den Netzhautbildern perspectivische Wahrnehmungen hervorgebracht werden, ohne dass durch Schattirung u. s. w. Momente für die Vorstellung geliefert und unter dem Einflusse derselben die Netzhautbilder ausgelegt würden. Ja, es geht aus meinen Versuchen mit den Linien im Stereoscop sogar hervor, dass nicht nur Neigung, sondern ein Zwang zu der Auslegung der Netzhautbilder als eines Objectes mit Tiefendimension obwaltet. Man hat nämlich, wenn man zwei Linien der beschriebenen Art bei dauernder Beleuchtung betrachtet, die Alternative, im Sammelbilde entweder die beiden Linien in der Ebene des Papiers sich kreuzend, oder eine Linie, welche gegen die Ebene des Papiers geneigt ist, zu sehen: beim Ueberspringen des Funkens sieht man aber immer nur das letztere, ohne dass hierbei der Einfluss der Vorstellung in Betracht kommen kann. Volkmann (Archiv f. Ophthalm. 1859, V. 2, p. 32) hat in einer grossen Reihe von Versuchen die Bedingungen bestimmt, unter denen Linien und Punkte zu einem Sammelbilde (mit Tiefendimension) vereinigt werden können, und unter denen dies nicht mehr geschehen kann, und gefunden, dass bei gewisser Winkelabweichung oder gewisser Distanz von Linien und Punkten von einander eine Vereinigung nicht mehr möglich ist, dass dagegen bei geringer Winkelabweichung oder Distanz eine Trennung der Linien oder Punkte im Sammelbilde nicht möglich oder wenigstens sehr schwierig ist. Volkmann hat bei seinen Versuchen allerdings nicht darauf geachtet, dass die Ver-

einigung der Linien jedesmal mit einem Heraustreten derselben aus der Ebene des Papiers verbunden ist. PANUM (Das Sehen mit zwei Augen 1858, p. 52) welcher schon vor VOLKMANN derartige Versuche angestellt und dabei das Heraustreten des Sammelbildes aus der Ebene des Papiers betont hat, hat auf Grund dieser und anderer Versuche gewisse Bezirke auf den Netzhäuten statuirt (Archiv für Anatomie und Physiologie 1861, p. 84), welche ihre Empfindungen räumlich zu verschmelzen geneigt sind. Ich habe, dieser Hypothese PANUM's folgend, die zum Verschmelzen im Sammelbilde geneigten Netzhautpunkte als stereoidentische Punkte bezeichnet (Physiologie der Netzhaut p. 319), welche nämlich zu einem Punkte im Raume zusammen projicirt werden, aber unter der Bedingung, dass sie vor oder hinter der durch den fixirten Punkt gelegten Ebene liegen.

Wenn wir nun die Tiefendimension bei momentanem Blick richtig erkennen und dazu immer erforderlich ist, dass die Punkte der Objecte sich auf nichtidentischen Stellen abbilden, wir dieselben aber doch nicht doppelt sehen, so glaube ich dies daraus erklären zu müssen, dass wir durch viele Erfahrungen unter Beihülfe von Augenbewegungen gelernt haben, dass gewissen disparaten Punkten unserer Netzhaut ein einfacher Punkt im Raume entspricht, welcher vor oder hinter dem fixirten Punkte liegt; durch die Häufigkeit der Erfahrungen ist uns die Combination dieser disparaten Punkte so geläufig geworden, dass es uns schwer wird, sie zu unterlassen. Mit welchem Zwange diese Combination eintritt, dafür bieten ein sehr frappantes Beispiel die Dove'schen ungleich gedruckten Buchstaben auf Platten für das Stereoscop (DOVE, Optische Studien 1859, p. 35 Druckplatte V): es ist mir ganz unmöglich, die Buchstaben im Sammelbilde doppelt zu sehen, immer treten sie einfach aus der Ebene des Papiers hervor.

Dass wir durch Erfahrungen Vorstellungen gewonnen haben, deren Reproduction um so leichter ist, je grösser die Häufigkeit der Erfahrungen war, geht aus dem gewöhnlichen Sehen im alltäglichen Leben hervor, ausserdem möchte ich dafür noch die Erscheinung des sogenannten Necker'schen Würfels oder Rhomboeders Figur 86 geltend machen. (NECKER, Edinburgh Philosophical Journal 1832, Bd. I. p. 334 u. Poggendorff's Annalen Bd. 27 p. 502.) Bei momentaner Beleuchtung erscheint mir die Figur immer so, dass der Punkt X vorn liegt, mag ich diesen oder den Punkt A fixiren. Stelle ich mir lebhaft vor, dass A vorn liegt, oder drehe ich die Zeichnung um 180°, so lege ich die Zeichnung auch demgemäss aus, aber sehr leicht verfalle ich wieder auf die frühere Auslegung, und ich muss gewissermassen gegen den Zwang der früheren Vorstellung ankämpfen, um A vorn und X hinten zu sehen. Ich vermuthe, dass das daher kommt, dass wir die Figur so auslegen, wie uns die Vorstellungen am geläufigsten sind: wir haben oft Bücher, Kisten u. s. w. in einer Lage gesehen, wie die, in welcher X vorn liegt, viel seltener oder nie in einer Lage, wo A vorn liegen würde. — Aehnliches tritt auch bei der Pseudoscopie (s. S. 625) ein: wenn ich zwei rechtwinklige Prismen so vor die Augen halte, dass das rechts gelegene Bild links, das links gelegene rechts erscheint, so wird es mir schwer, ein be-

Fig. 86.

kanntes Relief als Vertiefung zu sehen und es dauert einige Zeit, bis sich die Vorstellung, dass das Object vertieft sei, einstellt.

Es ist wohl anzunehmen, dass die Geläufigkeit der Vorstellung uns bestimmt, einen geneigten Faden als solchen und nicht als zwei sich kreuzende Fäden ohne Neigung zu sehen. Indess wir können doch nicht vollständige Rechenschaft geben, warum wir unter Umständen sehr bestimmte Urtheile über Tiefendimensionen haben, wenn die Objecte sehr einfach sind, und es ist namentlich zu berücksichtigen, dass wir nicht wissen, mit welchem Auge wir die eine und die andere Projection eines Fadens, einer Linie u. s. w. sehen. Ich führe zum Beweise dessen noch einen Versuch an von Hering (Archiv für Anatomie und Physiologie 1865, p. 153 und Archiv für Ophthalmologie 1868, XIV. 1, p. 3), ein Versuch, welcher zugleich beweist, dass wir ohne Augenbewegungen die Tiefendimension wahrnehmen: blickt man durch einen kurzen Cylinder und richtet die Augen auf die Spitze einer Nadel und lässt nun vor oder hinter der Nadelspitze ein Kügelchen von unbekannter Grösse herabfallen: so bestimmt man sofort sicher, ob das Kügelchen vor oder hinter der Nadelspitze herabfällt — wobei die Wände des Cylinders etwaige Anhaltspunkte für unser Urtheil verdecken. — Man vergleiche hierüber Donders, Archiv für Ophthalmologie XIII. 1, p. 28.

Auf den Einfluss, welchen Schattirung, Form, Grösse auf unsere Wahrnehmung der Tiefendimension haben, werden wir im nächsten Paragraph zurückkommen.

§ 64. **Das stereoscopische Sehen.** — Wir haben schon in § 59 und 63 darauf hingedeutet, dass wir die Ausdehnung von Objecten in der dritten Dimension beim monocularen Sehen wahrnehmen können und dass wir beim monocularen Sehen die Vorstellung von der absoluten und von der relativen Entfernung von Punkten oder Objecten gewinnen. Wir haben ferner durch die Gruppirung von Lineamenten, wie sie beim Sehen von körperlichen Objecten auf der Netzhaut sich abbilden, einen Gesichtseindruck, welcher beim Sehen mit einem Auge die Vorstellung eines nach drei Dimensionen ausgedehnten Objectes hervorbringt, wie z. B. alle stereometrischen Figuren beweisen. Aber selbst noch einfachere Lineamente, z. B. wie Hering (Beiträge 1862, II. p. 87) bemerkt, eine schwache verticale Linie von einer starken Linie (im sogenannten Wheatstone'schen Versuche s. § 61) durchkreuzt, erzeugt schon die Vorstellung, dass die starke Linie nicht in der Ebene des Papiers, auf dem sie gezeichnet ist, liegt. Noch viel mehr tritt der Eindruck des Körperlichen beim monocularen Sehen hervor, wenn wir eine perspectivische Zeichnung ansehen, und er wird noch erhöht, wenn die Vertheilung der Lichtintensitäten, die Schattirung denjenigen Lichtdifferenzen entspricht, welche wir an Körpern zu sehen gewohnt sind. Unter diesen Umständen ist sogar die Vorstellung und Wahrnehmung des Körperlichen viel lebhafter, wenn wir nur mit einem, als wenn wir mit beiden Augen sehen, und wir finden, dass, wenn wir alle diejenigen Momente, welche in uns die Vorstellung einer Fläche erwecken, fortschaffen, z. B. wenn wir den Glanz der Oberfläche einer Photographie durch passende Beleuchtung oder durch Untertauchen unter Wasser beseitigen, wenn wir die Entfernung der Bildfläche unsicher machen, indem wir es durch eine dunkle Röhre, ein grosses Convexglas (Panoramaglas) ansehen — dass dann der Eindruck des Körperlichen immer mehr überwiegt. Daraus er-

klärt sich denn auch der überraschende Eindruck sogenannter Dioramen oder Kosmoramen u. s. w.

Wir werden uns die Illusion bei derartigen Anschauungen kaum anders erklären können, als dass wir durch viele Erfahrungen über das Aussehen von Objecten, die wir als Körper kennen gelernt haben, unterrichtet sind, und dass wir die Eigenschaften, die uns wirkliche Körper zeigen, in jenen Bildern mehr oder weniger vollständig wiederfinden. Donders (A. f. O. 1871, XVII. 2, p. 24) hat nachgewiesen, dass wir sogar bei monocularer Betrachtung die entsprechenden Bewegungsinnervationen eintreten lassen, und die Convergenz unserer Gesichtslinien ändern, entsprechend der Vorstellung, welche wir uns von der Entfernung des Vorder- und Hintergrundes eines z. B. landschaftlichen Gemäldes machen und wiederum die Entfernungsinnervation auf unsere Vorstellung wirkt.

»Stellt man sich«, sagt Donders, »vor ein Gemälde, sieht nach irgend einem Gegenstande im Vordergrunde, bedeckt darauf das eine Auge mit einem kleinen Schirm und richtet nun den Blick auf einen Gegenstand des Gemäldes, den man sich in grösserer Entfernung vorzustellen hat, dann wird man beim Entfernen des Schirmes den Gegenstand in Doppelbildern sehen, die sich nun rasch einander nähern, womit die Illusion zum Theil verloren geht. Auch ein Anderer kann beobachten, dass das Auge hinter dem Schirm eine Bewegung nach aussen macht unter den angegebenen Umständen — und ich kann hinzufügen, dass ich unter diesen Verhältnissen ganz deutlich die Convergenz- und Divergenzbewegungen des geschlossenen Auges fühlen kann.«

Ein Theil der Momente, welche uns zur Wahrnehmung des Körperlichen bestimmen, wurde erst erkannt durch Wheatstone (Philosophical Transactions 1838 II. p. 371, deutsch in Poggendorff's Annalen, Ergänzungsband I. 1842, p. 1) indem er die Wahrnehmung von Körpern beim binocularen Sehen untersuchte. Er fand, dass ein Körper, welcher sich nahe vor dem Gesicht und in der Medianebene befindet, anders erscheint, wenn er mit dem einen, als wenn er mit dem andern Auge betrachtet wird, und wies nach, dass wenn jedem Auge das ihm zugehörige Bild des Körpers als Zeichnung dargeboten wird und man durch passende Einstellung der Augen die Vereinigung der beiden Zeichnungen ermöglicht, dann die Wahrnehmung des Körperlichen mit gleicher Präcision erfolgt, als wenn die Bilder des Körpers auf der Netzhaut entworfen werden.

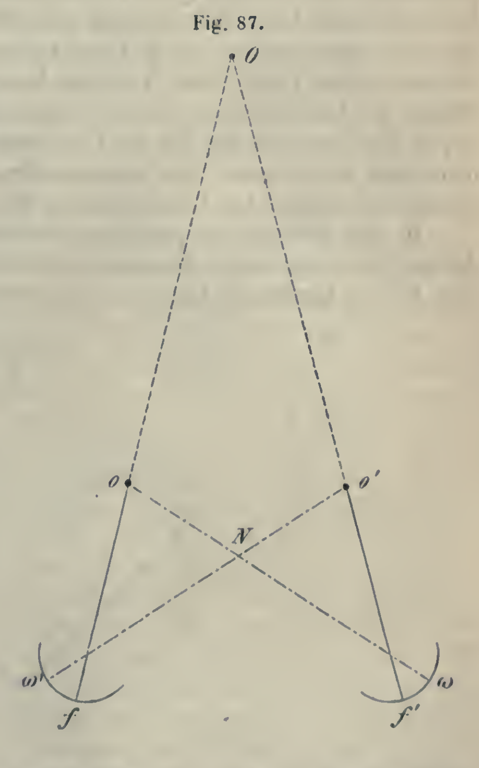
Die Zeichnungen, welche den Augen dargeboten werden, müssen, kurz gesagt, die Umkehrungen der Netzhautbilder des Körpers sein; wenn wir mit Wheatstone (Poggendorff's Annalen l. c. p. 7) den einfachsten Körper, einen von oben und vorn nach unten und hinten in der Medianebene geneigten Draht als Beispiel wählen, so würde, wenn wir den Mittelpunkt des Drahtes fixiren, auf der rechten Netzhaut das Bild desselben von unten und aussen durch die *Fovea centralis* nach oben und innen, auf der linken Netzhaut gleichfalls von unten und aussen nach oben und innen verlaufen, also Bilder von entgegengesetzter Neigung entworfen werden, natürlich mit perspectivischer Verkürzung. Je weiter vom fixirten Punkte aus ein Punkt des Drahtes den Augen liegt, um so weiter werden die Punkte der beiden Bilder von einander entfernt sein müssen, und umgekehrt und im fixirten Punkte fallen die Bilder auf die identischen Mittelpunkte der *Foveae centrales.* Die Bildpunkte aller übrigen Punkte des Drahtes fallen also auf nichtidentische Netzhautpunkte. — Fixiren wir den nächsten Punkt des Drahtes, so divergiren die Bilder auf den Netzhäuten von den Foveae nach innen und oben

ixiren wir den entferntesten Punkt, so divergiren sie nach innen und unten — mgekehrt auf den Projectionen in den Raum. Denken wir uns die Bilder mit len fixirten Punkten sich deckend auf einander gelegt, so werden die Bilder der äheren Punkte des Körpers um so weiter von einander liegen, je näher sie den ugen sind. Ihre Distanz bezeichnet HELMHOLTZ (Physiol. Optik p. 638) als tereoscopische Parallaxe; er nennt die Parallaxe positiv für die näheren, egativ für die entfernteren Punkte. BÖTTCHER (A. f. O. 1874, XX. 2, p. 182) agegen versteht unter stereoscopischer Parallaxe den Winkel, unter welchem on einem Punkte aus der Augenabstand des Beschauers erscheint.

Werden nun die entsprechenden Projectionsbilder als Zeichnungen den Augen orgehalten und dieselben auf zwei geometrisch gelegene Punkte derselben einestellt, so erscheint ein Sammelbild von den beiden Zeichnungen, welches, da ieselben den Projectionen des Drahtes entsprechen, ebenso aussehen muss wie er Draht selbst. Was von dem Drahte, seinen Projectionen und der Vereinigung er Zeichnungen seiner Projectionen zu dem Sammelbilde des Drahtes gilt, das ilt ebenso für Kegel, Würfel u. s. w., kurz für alle körperlichen Objecte.

Ausser dem Sammelbilde, welches von den fixirten Punkten ausgeht, erheinen aber noch zwei Halbbilder zu beiden Seiten des Sammelbildes, da der eobachter mit dem rechten Auge icht blos die rechte, sondern auch ie links gelegene Zeichnung und mit em linken Auge ausser der linken uch noch die rechtsgelegene Zeichung sicht, wie aus Figur 87 hervorcht. Sind o und o' die Mittelpunkte er beiden Zeichnungen, welche in zum Sammelbilde vereinigt weren, welche also auf die Foveae ff' er Netzhäute fallen, so wird auch och ein Bild von o in ω und von o' ω' entworfen. Die beiden Halbilder ω und ω' werden aber verhwinden, wenn man eine Scheideand in der Medianebene, welche ber den Punkt N hinausreicht, anringt und so die Bilder von o und o' bblendet.

Fig. 87.



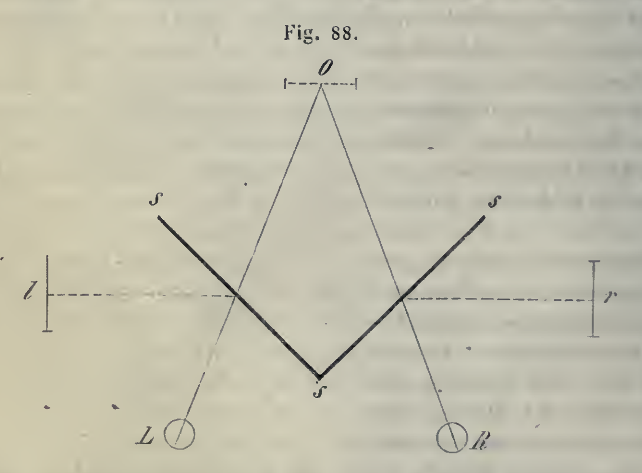
Man kann ferner eine Vereinigung er Zeichnungen zu einem Sammelilde, welches als Körper erscheint, beirken auf zweierlei Weise: Erstens ndem man den Mittelpunkten der eichnungen eine der Distanz der ugenmittelpunkte nahezu gleiche, der ein wenig geringere Distanz giebt, wie in Figur 87, und die Gesichtslinien ahezu parallel richtet, wie fo und $f'o'$, so dass die Vereinigung von o und o' um Sammelbilde in O erfolgt. Zweitens indem man die Gesichtslinien auf einen

näher gelegenen Punkt so convergiren lässt, dass die Mittelpunkte der Zeichnungen in diesem Punkte zum Sammelbilde zusammenprojicirt werden. Wären in Figur 87 $o\omega$ und $o'\omega'$ die Gesichtslinien, so würde das Sammelbild in den Punkt N fallen, ausserdem selbstverständlich die Halbbilder von o in f und von o' in f' entworfen werden: sollen diese abgeblendet werden, so müssen von beiden Seiten her Schirme vorgeschoben werden. — Es ist ohne weiteres ersichtlich, dass das Sammelbild in beiden Fällen verschieden sein muss, indem ja dabei die Projectionen für das rechte und für das linke Auge vertauscht werden: was bei Parallelstellung der Gesichtslinien im Sammelbilde näher erscheint, muss bei Convergenzstellung ferner als der fixirte Punkt erscheinen und umgekehrt.

Offenbar werden nun, wenn das Sammelbild deutlich erscheinen soll, die Augen für die Entfernung der Ebene, auf welcher die beiden Projectionszeichnungen entworfen sind, accommodirt sein müssen. Bei Parallelstellung der Gesichtslinien sind aber die Augen nicht für die in deutlicher Sehweite (200 Mm.) befindlichen Zeichnungen bei emmetropischen Augen accommodirt, sondern für grosse Ferne, und bei Convergenzstellung sind sie zugleich für grössere Nähe, als für die Nähe der Zeichnung accommodirt. Es muss also für Jeden, der nicht unabhängig von der Augenstellung accommodiren kann (und dies können verhältnissmässig wenige Leute), eine künstliche Verbesserung der Accommodation durch Brillen herbeigeführt werden, und zwar bei Parallelstellung durch Convexgläser, bei Convergenzstellung durch Concavgläser. Myopen brauchen allerdings bei Parallelstellung keine Gläser, da ihre brechenden Medien gleich den brechenden Medien der Emmetropen + einem Convexglase sind, Presbyopen und Hypermetropen dagegen brauchen für die Convergenzstellung kaum Gläser, da der Presbyop nicht für grössere Nähe accommodiren kann, der Hypermetrop aber gleich einem Emmetropen mit Concavgläsern ist.

Da nun theils die besprochenen Halbbilder störend sind, theils eine Veränderung der natürlichen Accommodation erforderlich ist, so haben Wheatstone und Andere besondere Apparate, durch welche jene Störungen vermieden wer-

Fig. 88.



den, construirt, welche unter dem Namen »Stereoscope« bekannt sind. Wir beschreiben einige dieser Apparate.

1) Das älteste ist von Wheatstone (l. c.) angegeben und heisst Wheatstone-
sches Spiegelstereoscop. Es besteht (Fig. 88) aus zwei unter einem rechten
Winkel zusammengefügten Planspiegeln *sss*, in welchen die dem rechten und
inken Auge zugehörigen Projectionszeichnungen *r* und *l* sich spiegeln, welche in
ler Entfernung des deutlichen Sehens vor den Spiegeln unter 45° gegen die
spiegelnde Fläche aufgestellt sind. Die Augen *L* und *R* sehen dann die Spiegel-
bilder vereinigt in *O* als Sammelbild. — Es ist zweckmässig, die Bilder von den
Spiegeln weiter entfernen und sie denselben nähern zu können, was sich leicht
für den Apparat einrichten lässt. — Man sieht in dem Wheatstone'schen Stereo-
scope nur das Sammelbild, da die beiden Projectionszeichnungen ganz zur Seite
iegen, und man sieht sie in der Entfernung der deutlichen Sehweite, also scharf
und deutlich.

2) Brewster's Prismenstereoscop (Report of the British Association 1849,
2, p. 5 und Brewster, Das Stereoscop, deutsch von Schmidt, Weimar 1862) besteht
aus zwei mit ihren brechenden Kanten nach innen liegenden Prismen *PP* mit
convexen Oberflächen (Hälften einer dicken Convexlinse von etwa 200 Mm. Brenn-
weite), eine *r* für das rechte *R*, eine *l* für
das linke Auge *L*, durch welche man mit
parallelen Gesichtslinien (Fernstellung mit
Accommodation für die Ferne) nach den
etwa 200 Mm. entfernten Bildern *r* und *l*
für das rechte und linke Auge blickt;
zwischen den beiden Prismen in der Me-
dianebene befindet sich ein bis in die
Nähe der Zeichnungen reichender schwar-
zer Schirm *ss*. Durch die Wirkung der
Prismen werden bei parallelen Gesichts-
linien die geradeaus gelegenen Punkte der
Zeichnung zusammengeschoben, so dass
r und *l* in *o* zu liegen scheinen (Figur 89).
Durch die Convexität der Prismenober-
flächen wird das Auge richtig accom-
modirt.

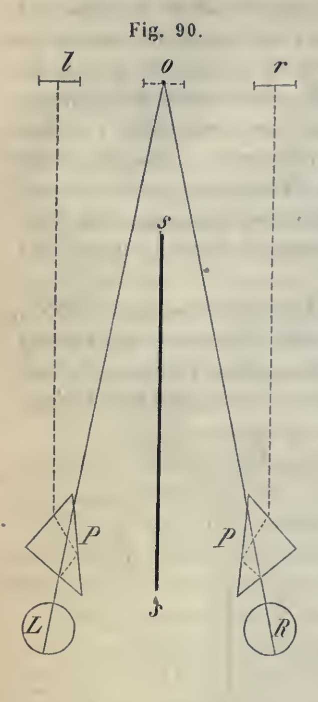
Fig. 89.

3) Das einfache Linsenstereo-
scop, wahrscheinlich auch von Brewster angegeben und von Loudon in Dundee
vor 1850 angefertigt (Brewster, Das Stereoscop 1862, p. 30), hat statt convexer
Prismen gewöhnliche Linsen von etwa 200 Mm., sonst ist es ebenso wie No 2;
es kommt wegen des Parallelismus der Gesichtslinien ebenso gut eine Verschmel-
zung der Bilder zu Stande. — Dieses Stereoscop hat Helmholtz (Physiologische
Optik p. 680) dadurch verbessert, dass er erstens statt einer biconvexen zwei
planconvexe Linsen anwendet, die obere dem Auge nähere von 120 Mm., die
andere der Zeichnung nähere von 180 Mm. Brennweite. Sie werden in Röhren
befestigt, welche ausgezogen und verschieden eingestellt werden können nach
dem Brechungszustande der Augen des Beobachters, und können ausserdem ent-
sprechend der Distanz der Augenmittelpunkte verschieden weit von einander
durch Schrauben gestellt werden.

4) Statt der von Wheatstone angewendeten Spiegel hat Dove (Farbenlehre

1853, p. 191) rechtwinklige Prismen PP angewendet, welche wie in Figur 90 vor den Augen L, R angebracht werden, indem an der Hypotenuse eine totale Reflexion stattfindet. Moigno hat dafür den Namen *Stereoscope à réflexion totale* vorgeschlagen. Für gewisse Zeichnungen kann man den stereoscopischen Effect auch erreichen, wenn man nur eine Zeichnung anwendet und diese mit einem freien Auge und einem mit der Hypotenuse nach aussen gerichteten rechtwinkligen Prisma vor dem anderen Auge betrachtet. (Dove, l. c. p. 196 Figur 4.) Daselbst hat Dove noch andere stereoscopische Vorrichtungen beschrieben. Vergl. auch Dove, Optische Studien 1859.

Fig. 90.



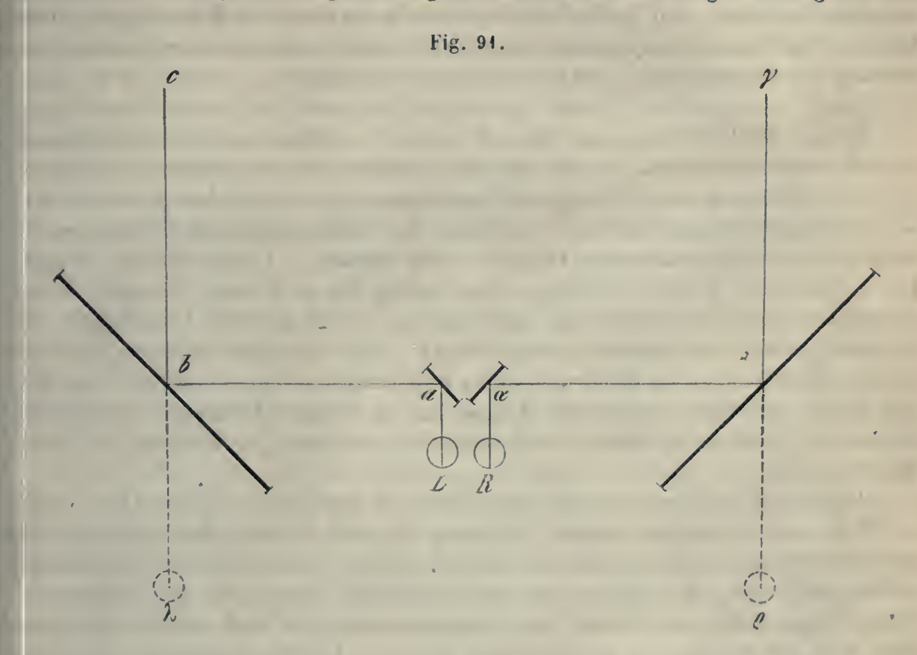
5) An die letztere Methode von Dove schliesst sich das neuere stereoscopische Mikroscop von Nachet (Helmholtz, Physiol. Optik p. 682), in welchem die Strahlen von dem einfach vorhandenen flächenhaften Objecte theils auf dem gewöhnlichen Wege durch den Tubus in das eine Auge des Beobachters gehen, zum andern Theile aber von einem kleinen Prisma total reflectirt werden nach einem zweiten Prisma, durch welches sie in den Tubus für das andere Auge reflectirt werden. Helmholtz giebt von der Wirkung dieses Instrumentes folgende Erklärung: »alle Punkte der Focalebene des Mikroscops geben ein punktförmiges Bild, alle Punkte aber, die vor oder hinter der Focalebene liegen, geben kleine Zerstreuungskreise, und wegen der Halbirung des Strahlenbündels fällt die eine Hälfte eines jeden Zerstreuungskreises in das rechte, die andere in das linke Auge. Da nun die rechte Hälfte des Zerstreuungskreises anders liegt, als die linke, so kommt dadurch eine stereoscopische Wirkung zu Stande«. Die nähere Begründung s. bei Helmholtz, Physiol. Optik p. 683. — Eine andere Form des stereoscopischen Mikroscops, auf deren Princip der binoculare Augenspiegel von Giraud-Teulon gegründet worden ist, s. dieses Handbuch III. 1, p. 157. Andere Formen von Stereoscopen beschreiben Helmholtz und Dove l. c. — Angaben über die Anfertigung stereoscopischer Bilder s. bei Helmholtz, l. c. p. 687, und Brewster, Das Stereoscop 1862, p. 228 u. f. Von besonderem Interesse sind noch

6) das Telestereoscop von Helmholtz. Es hat den Zweck, auch an sehr entfernten Objecten, welche bei der natürlichen Entfernung der beiden Augen von einander keine merklich differenten Bilder in denselben entwerfen, das stereoscopische Relief wahrnehmbar zu machen; dies bewerkstelligt Helmholtz durch künstliche Vergrösserung der Augendistanz mittelst 4 Planspiegeln, wie es Figur 91 (Helmholtz, Physiol. Optik p. 648, Figur 192) zeigt. Das von den Punkten c und γ kommende Licht wird von den grossen Spiegeln b und β nach den kleineren Spiegeln a und α reflectirt und gelangt von diesen in die Augen des Beobachters L und R. Es werden nun in den grossen Spiegeln Bilder entworfen, und in die Augen reflectirt, welche so grosse Differenzen gegen ein-

ander zeigen, als die Netzhautbilder in Augen haben würden, welche sich in ϱ und λ befänden.

Ein grösseres Telestereoscop von HELMHOLTZ ist so construirt, dass entsprechend der Vergrösserung der Augendistanz auch die Vergrösserung der Ob-

Fig. 91.



jecte zunimmt. Die Beschreibung desselben s. Physiol. Optik p. 681, Taf. IV. Figur 3. cf. Poggendorff's Annalen 1857, Bd. 101, p. 494 und Bd. 102, p. 167.

7) Das Pseudoscop von WHEATSTONE (HELMHOLTZ, Physiol. Optik p. 646) besteht wie DOVE's Prismenstereoscop (No. 4 Fig. 91) aus zwei mit der Hypotenuse medianwärts oder lateralwärts vor die Augen gehaltenen rechtwinkligen Prismen. Es hat den Zweck die binocularen Bilder wirklicher Körper so zu verändern, dass man umgekehrte Reliefs davon erhält, also das Hervortretende oder Erhabene vertieft erscheint und umgekehrt.

HELMHOLTZ bemerkt, dass die pseudoscopische Täuschung nur an einer kleinen Anzahl von Gegenständen gelingt, weil theils die Kenntniss der gewöhnlichen Formen, theils die Schlagschatten hindernd in den Weg treten, und fügt hinzu, dass eine lebhafte Vorstellung von der pseudoscopischen Form die Erscheinung der Pseudoscopie begünstige, und wenn diese Vorstellung einmal gebildet sei, sie auch ohne Mühe bestehen bliebe. Ich kann dem nur beistimmen, finde aber häufig ein ganz unmotivirtes Umschlagen der Pseudoscopie in die richtige Stereoscopie während ganz ruhiger und unveränderter Betrachtung des Objectes. Ich würde glauben, dass man es hierbei mit Wettstreitserscheinungen der Netzhäute zu thun habe, wenn ich nicht beim Sehen durch ein rechtwinkliges Prisma mit einem Auge, während das andere geschlossen ist, ganz dieselben Wechselerscheinungen wahrnähme. Ein recht geeignetes Object ist ein der Länge nach geknifftes und wieder auseinandergeschlagenes Blatt Papier, welches von der

Seite her beleuchtet wird. Innerhalb einer Minute findet ein drei- bis viermaliger Wechsel statt: bald bildet das Papier einen Winkel, bald eine Kante. — Ferner habe ich öfters bei Bas- und Haut-Reliefs im ersten Momente des Anschauens durch das Pseudoscop eine lebhafte Umkehrung des Reliefs in Vertiefung wahrgenommen, welcher aber sofort die Rückkehr zum richtigen Relief folgte; diese letztere Anschauung des richtigen Reliefs blieb dann trotz der energischsten Vorstellung der Pseudoscopie ganz unabänderlich bestehen.

§ 65. Wahrnehmung der Grösse. — Man unterscheidet absolute Grösse, scheinbare Grösse, geschätzte (oder wirkliche) Grösse und relative Grösse.

Wir haben schon in § 55 darauf hingewiesen, dass wir über die absolute Grösse nichts wissen können, da wir über die Grösse unserer die Grösse empfindenden oder wahrnehmenden Organe nichts wissen. (cf. Porterfield, On the Eye 1759, T. II. p. 365 u. f.) Am deutlichsten hat sich Ernst Heinrich Weber (Handwörterbuch der Physiologie 1846, III. 2, p. 528) über die Unfähigkeit, die absolute Grösse wahrzunehmen, ausgedrückt: wenn wir uns vorstellen, dass wir in allen Dimensionen zu der Grösse eines Infusionsthierchens verkleinert würden, alle Dinge der Welt in gleichem Maassstabe an Grösse abnähmen und alle Bewegungen proportional kleiner und langsamer würden, so würden wir davon nichts merken.

Unter scheinbarer Grösse verstehen wir den Gesichtswinkel, unter welchem sich etwas auf unserer Netzhaut abbildet — beide Benennungen sind geradezu synonym. Da ein und dasselbe Object unter um so kleinerem Gesichtswinkel erscheint, je weiter es von uns entfernt ist, anderseits die wahrgenommene Grösse sehr verschieden ist, je nachdem wir ein und dasselbe Netzhautbild, z. B. ein Nachbild in grössere oder geringere Entfernung projiciren, so wird die Grösse, welche wir einem Objecte beilegen, immer abhängig sein zugleich von dem Gesichtswinkel und der Entfernung des Objectes: diese Grösse werde ich nach Förster's Vorschlage (Ophthalmologische Beiträge 1862, p. 69) als geschätzte Grösse bezeichnen. Der Ausdruck »wirkliche Grösse«, welcher dafür gebraucht wird, ist zu unklar und, bei unserer Unkenntniss von dem Wirklichen, nicht bezeichnend.

Wir verfahren nun bei der Schätzung der Grösse keineswegs consequent, so dass wir etwa unsere Netzhautbilder in eine bestimmte Entfernung projicirten, dann mit einander verglichen und daraus die dem Object zuzuschreibende Grösse berechneten. (cf. Panum, Archiv für Ophthalm. 1859, V. p. 1—36. — Förster, Ophthalm. Beiträge 1862, p. 70.) Vielmehr haben wir kein einheitliches Maass für die Grösse unserer Netzhautbilder, sondern messen dieselben nach verschiedenem Maasse. Wer denkt daran, sagt Förster, dass der Bleistift auf dem Tische gerade so dick erscheint, wie ein Fichtenstamm vor dem Fenster? Wir sind nicht im Stande anzugeben, ein wie grosses Stück einer Häuserfront durch einen Maassstab von 3 Zoll gedeckt wird, den wir eben in 10 Zoll Entfernung von den Augen gehalten haben. Förster stellte einer Gesellschaft von Aerzten die Aufgabe, die Grösse des Mondes auf ein Blatt Papier in 300 Mm. Entfernung aufzuzeichnen: es wurden Kreise von 8 Zoll Durchmesser, 1 Zoll Durchmesser u. s. w. gemalt, aber keiner malte einen Kreis von 1,5 Linien, welcher dem Gesichtswinkel des Mondes von $1/2^{\circ}$ entsprochen hätte. Schon

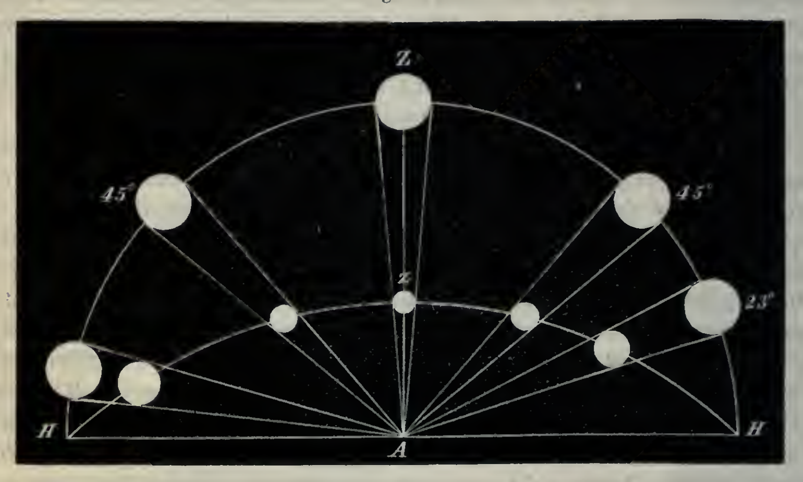
Porterfield (l. c. II. p. 373) sagt: *the Sun and Moon are only circular planets of about a foot in diameter, if we believe the testimony of our eyes.* — Anderseits haben wir gewisse bestimmte Vorstellungen von der Grösse eines Objectes, die bei den verschiedensten Grössen der Netzhautbilder unverändert bleibt, ohne dass wir etwa eine Reduction zwischen Netzhautbild und Entfernung vornähmen: von einem Menschen haben wir eine gewisse Grössenvorstellung, ebenso von seinem Kopfe; wenn wir nun in einem Saale einige Hundert Menschen vor uns sehen, die in sehr verschiedener Entfernung sitzen, so denken wir gar nicht daran, dass die Gesichtswinkel für die hintersten Köpfe vielleicht hundertmal kleiner sind, als die für die vordersten Köpfe, und wenn wir von der Zuhörerschaft ein Bild etwa auf einer matten Glastafel mittelst einer Linse entwerfen, so können wir uns auf dem Bilde zuerst nicht zurecht finden, und es bedarf erst besonderer Ueberlegung, wie wir dieses Bild auszulegen haben — und doch ist dieses Bild völlig ähnlich dem Bilde auf unserer Netzhaut.

Gleichwohl bleibt keine andere Annahme übrig, als dass wir nach Gesichtswinkel und Entfernung die Grösse schätzen oder beurtheilen und unsere Erfahrungen darüber nicht auf ein einheitliches Maass reduciren, die Conflicte aber, die sich in Folge dieser Unordnung gelegentlich einstellen, theilweise ignoriren, theilweise gewaltsam und mit einer gewissen Willkür beilegen.

Den Einfluss, welchen die Kenntniss der Entfernung auf die Grösse hat, die wir uns vorstellen, lernen wir kennen aus Wahrnehmungen, in welchen wir durch irgend welche Momente zu einer falschen Beurtheilung der Entfernung veranlasst werden. Wir haben schon in § 59 auf die Erscheinungen der Mikropsie in Folge gestörter Accommodationsfähigkeit aufmerksam gemacht, welche zuerst Donders (Nederlansh Lancet, April 1851), dann Förster (Ophthalmologische Beiträge 1862, p. 71) von dem Gesichtspunkte aus erklärt haben, dass die Grösse der Objecte in Folge der falschen Beurtheilung der Entfernung derselben auch falsch beurtheilt würde. Die Erscheinungen liefern auch zugleich ein Beispiel, wie gewaltsam unser Vorstellungsvermögen Conflicte entscheidet: wegen unrichtiger Schätzung des Accommodationsimpulses erscheinen uns die Objecte in zu grosser Nähe; weil wir sie in grössere Nähe projiciren, erscheinen sie uns kleiner; weil sie uns zu klein erscheinen, projiciren wir sie in grössere Entfernuhg. — Wir haben ferner in § 63 den Einfluss der Convergenz unserer Augen auf die Beurtheilung der Entfernung besprochen und können hier nur hinzufügen, dass für ein und dasselbe Object auch die Grösse abnimmt, wenn die Entfernung, in welche wir projiciren, abnimmt, also in den dort erwähnten Versuchen von Lehot, Hermann Meyer u. A. Ich will hier nur noch auf ein altes, schon von Ptolemäus (Priestley-Klügel, Geschichte der Optik 1776, p. 11 und 505) erwähntes Problem hinweisen, auf die verschiedene Grösse, in welcher uns der Mond am Horizont und am Himmelsgewölbe erscheint, während sein Gesichtswinkel immer derselbe bleibt. Smith (Smith-Kästner, Lehrbegriff der Optik 1755, p. 55, Figur 63, Tafel VII.) erklärt dies aus der Form, welche wir dem Himmelsgewölbe zuschreiben, welche nicht die einer Halbkugel, sondern die eines kleineren Stückes einer Halbkugel, vergleichbar der Form eines Uhrglases ist. Dass wir diese Vorstellung von der Form des Himmelsgewölbes haben, beweist Smith aus Beobachtungen, in welchen die Mitte des Bogens zwischen Horizont und Zenith bestimmt wurde, und aus denen sich ergab, dass ein Stern in der Mitte

zwischen Zenith und Horizont zu liegen schien, welcher nur 23° vom Horizont entfernt war. Daraus hat SMITH die scheinbare Gestalt des Himmelsgewölbes berechnet. Beobachtungen liegen ausser den Smith'schen keine vor, doch haben BOHNENBERGER (Astronomie p. 82) und DROBISCH (Leipziger Berichte 1855, III. p. 107) die Formeln zur Berechnung entwickelt. Bedeutet also in Figur 92 *HZH* den Halbkreis der Mondbahn, so ist die scheinbare Gestalt des Himmelsgewölbes, wenn sich der Beobachter in *A* befindet, *HzH*, und die scheinbare Mitte zwischen Zenith und Horizont liegt bei 23°, nicht bei 45°. Wenn wir nun aus in § 66 zu

Fig. 92.



besprechenden Veranlassungen die Entfernung *AH* grösser schätzen, als die Entfernung *Az*, so wird uns in *z* der Mond kleiner erscheinen müssen, als in der Nähe von *H*. — Uebrigens wären neue Bestimmungen der scheinbaren Form des Himmels sehr wünschenswerth, denn dieselbe ist jedenfalls nicht constant: der klare Sternhimmel ist jedenfalls ein grösserer Kugelabschnitt, als der bewölkte Himmel; ausserdem erscheint der aufgehende Mond von sehr verschiedener Grösse bei nebligem und bei klarem Horizonte, über einer weiten Ebene und über einer nahen Mauer — allerdings wohl abhängig von der Entfernung, in welche wir den Horizont projiciren.

Bei dem Mangel eines constanten Maassstabes für die Schätzung der Grösse und bei der Nachlässigkeit und Oberflächlichkeit, mit welcher wir im alltäglichen Leben sehen, ist es verständlich, dass wir auch selten zu Conflicten kommen, wenn uns von dem einen Auge andere Grössen gemeldet werden, als von dem anderen. Hält man z. B. den rechten Zeigefinger in einer Entfernung von 100 Mm. gerade vor das rechte Auge, so wird er, wenn die Gesichtslinien auf ihn gerichtet sind, dem rechten Auge grösser erscheinen, als dem linken und die Differenz zeigt sich in der That sehr gross, wenn man abwechselnd das rechte und linke Auge schliesst; bei gehöriger Aufmerksamkeit kann man sogar das kleine Bild des Fingers innerhalb des grossen Bildes deutlich sehen (HERING, Beiträge 1861, I. p. 18); wir ignoriren aber für gewöhnlich das eine, und zwar das kleinere Bild ohne weiteres und beachten nur das grosse Bild.

Mit der Labilität unserer Vorstellung von der Grösse hängt wohl auch der bedeutende Einfluss des Contrastes auf die Grössenschätzung zusammen: sehen wir bekannte Arten von Objecten und es erscheint daneben ein Object gleicher Art von erheblich bedeutenderer Grösse, so erscheinen alsbald die übrigen Objecte viel kleiner als vor dem Erscheinen des sehr grossen Objectes. Mir scheint die Täuschung darauf zu beruhen, dass sich dann die Aufmerksamkeit auf das Object von riesiger Grösse richtet und dasselbe eben dadurch Maassstab der Grösse für uns wird und sich damit weiter unser sehr unsicherer Maassstab ändert.

Dass die Aufmerksamkeit einen grossen Einfluss hat, davon habe ich mich vielfach überzeugt, nachdem ich folgende sehr günstige Gelegenheit zur Beobachtung der Contrastwirkung gehabt hatte: Auf einem Balle erschien in einer Cotillontour der Riese Murphy salonmässig gekleidet und überreichte den Damen Bouquets: alle Gäste erschienen augenblicklich sehr klein und dieser Eindruck blieb auch noch einige Minuten, nachdem der Riese schon wieder fortgegangen war. Ich habe später oft sehr grosse Menschen neben kleineren gesehen, ohne diesen Contrasteindruck zu haben, wenn die grossen Menschen nicht gerade die Aufmerksamkeit auf sich zogen: letzteres war aber in dem erzählten Beispiele in sehr hohem Grade der Fall.

§ 66. Schätzung der relativen Grösse. — Augenmaass. — Unter relativer Grösse verstehen wir das Verhältniss zweier Grössen zu einander und es ist die erste Frage, wie genau wir die Gleichheit oder die Ungleichheit zweier Grössen wahrzunehmen im Stande sind — von der Genauigkeit dieser Wahrnehmung wird es dann abhängen, in welchem Grade wir das »Um wie viel grösser« beurtheilen können.

Volkmann (Physiologische Untersuchungen I. 1863, p. 119 u. f.) hat sich die Aufgabe gestellt, zu beobachten, wie genau man eine Distanz zweier Linien der gegebenen Distanz zweier Linien gleich machen könne, und ist zu dem Resultate gekommen, dass für mittlere Grössen, z. B. die Distanz von 50 Mm. bis 100 Mm. in einer Entfernung von 300 Mm. die Einstellung der dritten Linie sehr genau ist, und die mittleren Fehler nur etwa 1% betragen. Kleine Fehler werden dadurch bedingt, dass man eine links gelegene einzustellende Linie etwas weniger genau einstellt, als eine rechts gelegene Linie. Auch ich (Physiologie der Netzhaut p. 263) habe gefunden, dass die Fehler bei mir nicht sehr gross sind, aber doch etwas mehr, nämlich 1% bis 4% betragen; ich habe aber auch bei diesen Einstellungen immer die mittlere Linie fest fixirt und Augenbewegungen möglichst vermieden. Die Einstellung ist im Ganzen so genau, wie sie bei der Feinheit des Raumsinnes nur irgend erwartet werden kann.

Die Genauigkeit dieser Einstellung ist von Bedeutung für die Genauigkeit unserer Augenbewegungen: denn, wenn wir eine Augenbewegung intendiren, so beabsichtigen wir ja, dieselbe gerade so gross zu machen, dass wir die Gesichtslinien auf den vorher indirect gesehenen Punkt einstellen. Wenn wir also die Lage desselben, d. h. seine Entfernung von dem fixirten Punkte sehr falsch schätzten, so würden wir nicht im Stande sein, eine prompte Augenbewegung auszuführen, sondern dieselbe zu gross oder zu klein intendiren, und erst nach mehrfachem Probiren und Corrigiren die Gesichtslinien auf den zu fixirenden Punkt einstellen. Dass wir in Bezug auf die Richtung und auch in Bezug auf die Entfernung von einem indirect gesehenen Punkte ziemlich genaue Wahrnehmungen

haben, hat auch DONDERS gezeigt (Archiv f. Ophthalm. 1871, XVII. 2, p. 28 und p. 59 u. f.) durch Versuche, in welchen die Stelle, wo ein indirect gesehener Funken übersprang, mit dem Finger zu treffen war.

ZÖLLNER (Poggendorff's Annalen 1860, Bd. 110, p. 50), HERING (Beiträge 1861, p. 68) und KUNDT (Poggendorff's Annalen 1863, Bd. 120, p. 118) haben nun Bedingungen gefunden, unter denen wir Distanzen von Punkten oder Linien, so wie die Richtungen von Linien falsch schätzen oder falsch wahrnehmen.

Zeichnet man 4 Punkte, wie in Figur 93, von denen der Punkt 1 von dem Punkte 4 um 100 Mm. entfernt ist, auf eine Tafel und stellt die Aufgabe, einen Punkt 5 in derselben Distanz von Punkt 4 einzustellen, welche Punkt 1 von Punkt 4 hat, so stellt man den Punkt nicht auf 100 Mm., sondern auf etwa 112 Mm. ein, denn wenn er auf 100 Mm. eingestellt ist, wie in Figur 93, so scheint er näher an Punkt 4 zu sein, als Punkt 4 von Punkt 1 ist. Wendete ich (Physiologie der Netzhaut p. 263) verticale Streifen statt der Punkte der Deutlichkeit wegen an, so stellte ich an dem daselbst beschriebenen Apparate den fünften Streifen in 10 Versuchen auf

Fig. 93.

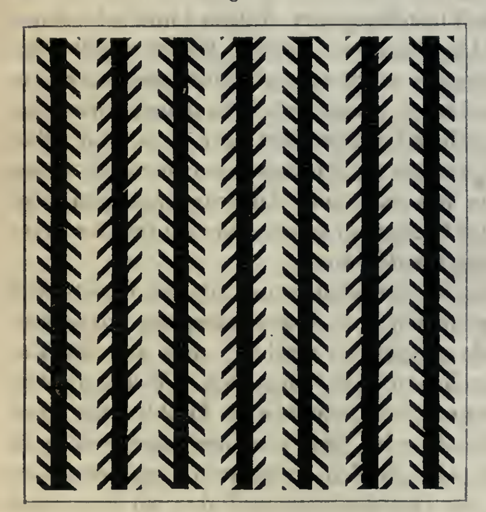
1 2 3 4 5

110 — 109 — 113 — 111 — 113 — 112 — 114 — 114 — 110 — 114 Mm.,
im Mittel 112 Mm.

ein; stellte ich ihn auf 107 ein, so erschien mir die Distanz von 4 bis 5 deutlich zu klein, stellte ich ihn auf 120 Mm. ein, so erschien sie mir deutlich zu gross.

Da ich nach derselben Methode die Einstellung der Streifen, wenn ausserdem nur 2 Linien in gegebener Distanz vorhanden waren, sehr genau gleich der gegebenen Distanz gemacht hatte, da ferner Jedermann die Distanz in der Figur 93 zwischen 1 und 4 für grösser hält, als die Distanz zwischen 4 und 5, so ist die Täuschung wohl als eine constante anzusehen.

Fig. 94.



Die Erklärung, welche HERING und KUNDT von der Erscheinung geben, dass nämlich die Distanz nicht nach der Tangente, sondern nach der Sehne des Gesichtswinkels geschätzt werde und die Summe der Sehnen von 1 zu 2, 2 zu 3, 3 zu 4 grösser sei, als die Sehne von 4 zu 5, habe ich (Physiologie der Netzhaut p. 266) nicht mit den Beobachtungen in Uebereinstimmung gefunden, da die Fehldistanz sehr viel grösser gefunden wird, als die aus den Sehnen der Gesichtswinkel berechnete Distanz. Eine andere Erklärung ist bis jetzt nicht gegeben worden.

Die Beobachtung ist aber von Interesse für die in § 65 besprochene Erscheinung der Grösse des Mondes: bis zur Grenze des Horizontes sehen wir ja viele Objecte, entsprechend der Reihe

der 4 Punkte, nach dem Zenith hin aber nichts, wir werden daher in der Lage sein, die horizontale Entfernung des Mondes für grösser zu halten, als die verticale Entfernung desselben.

Mit der besprochenen Täuschung ist eine andere Erscheinung in Verbindung gebracht worden — wohl nicht mit Recht —, welche zuerst von Zöllner an dem Muster Figur 94 beobachtet wurde: die schwarzen verticalen Streifen scheinen gegen einander geneigt und die schiefen kleinen Streifen passen (worauf Zöllner von Poggendorff aufmerksam gemacht worden ist) nicht auf einander nach ihrem Durchgange durch die verticalen Streifen, sondern zeigen eine noniusartige Verschiebung. Aehnliche Verschiebungen treten ein an Figuren, welche Hering construirt hat.

Folgende Bedingungen sind von Zöllner für das Auftreten der Verschiebung an seiner Figur ermittelt worden: 1) die Divergenz und Convergenz der schwarzen und weissen Parallellinien tritt stärker hervor, wenn dieselben gegen die Verbindungslinie der Augenmittelpunkte um 45° geneigt sind, als wenn sie parallel zu derselben oder rechtwinklig gegen sie verlaufen; 2) die Täuschung tritt sowohl beim binocularen als beim monocularen Sehen auf; 3) die noniusartige Verschiebung ist unabhängig von der scheinbaren Ablenkung der Längsstreifen; 4) die Ablenkung der Längsstreifen ist am grössten, wenn die Querstreifen einen Winkel von 30° mit den Längsstreifen bilden; 5) dass die Täuschung verschwindet bei Neigung der Zeichnungsebene gegen die Visirebene. Dann hat Kundt gefunden 6) dass die Täuschung zu- und abnimmt bei geringerer oder grösserer Entfernung des Auges von dem Objecte; 7) dass sie zunimmt mit der Anzahl der Querstriche. 8) Helmholtz (Physiol. Optik p. 567) hat nachgewiesen, dass bei der Beleuchtung mit dem elektrischen Funken die Täuschungen manchmal fehlen, manchmal schwächer sind, manchmal ebenso wie bei dauernder Beleuchtung; 9) dass sie im Nachbilde verschwinden.

Dass die von Hering und Kundt versuchte Erklärung der Erscheinung nicht zutreffend ist, habe ich (Physiologie der Netzhaut p. 271) und später Helmholtz (Physiol. Optik p. 571) gezeigt. Dagegen hat Volkmann (Physiologische Untersuchungen p. 162) die Täuschung aus einer durch die schiefen Querstriche bedingten Veränderung der Projectionsfläche abgeleitet, eine Erklärung, mit der sich auch Zöllner (Volkmann l. c. p. 164) einverstanden erklärt hat; die schiefen Querstriche rufen nämlich die Täuschung hervor, als ob sie in einer gegen das Papier geneigten Ebene lägen und die scheinbare Neigung der Längsstreifen gegen die Ebenen erscheint dann als eine Neigung der Längsstreifen gegen einander. Die Täuschung würde sich dann der schon erwähnten unrichtigen Projection im Wheatstone'schen Versuche (§ 61) anschliessen. Für diese Erklärung würde auch noch der Umstand sprechen, dass die Erscheinung der Divergenz und Convergenz der Längsstreifen bei längerer Betrachtung und Durchmusterung der Zöllner'schen Figur immer mehr schwindet.

IV. Augenbewegungen.

§ 67. Allgemeine Aufgaben. Motive. — An keinem Gelenk des Körpers lassen sich die Bewegungen mit so grosser Genauigkeit untersuchen, wie an dem Augapfel: theils sind die Krümmungsverhältnisse des Gelenkkopfes genau zu ermitteln, theils der Punkt, um welchen die Drehungen des Augapfels erfolgen, theils die Angriffspunkte und Richtungen, in welchen die Muskeln liegen, genauer als an andern Gliedern des Körpers zu bestimmen. Hauptsächlich aber ist die Netzhaut ein Organ, welches seine eigenen Bewegungen mit einer Genauigkeit und Feinheit selbst ablesen kann, wie es kaum die complicirtesten Instrumente würden möglich machen können. Die bei der Bewegung gebildeten »Spurlinien« der Netzhaut sind ausserdem durch die Nachbilder für einige Zeit zu conserviren und mit objectiven Richtungen und Maassen vergleichbar, so dass wir theils mittelst subjectiver, theils mittelst objectiver Beobachtungen und Messungen die Bewegungen des Augapfels untersuchen können. Ausserdem lässt sich endlich das Reflexbildchen der Hornhaut zu genauen Messungen der Augenbewegungen benutzen.

Die erste Aufgabe für die Untersuchung der Augenbewegungen wird sein müssen, die Lage des Punktes, bezw. der Punkte im Augapfel zu bestimmen, um welche die Drehungen des Auges erfolgen; demnächst sind die Muskelebenen festzustellen, in welchen die Bewegungen durch die anatomisch gegebenen Ansatzpunkte und Richtungen der Muskeln erfolgen, woraus sich zugleich die Drehungsaxen für dieselben ergeben; im Zusammenhange hiermit wird die Bestimmung des Querschnittes der Muskeln zu machen sein, um die Grösse der Kraft zu bestimmen, mit welcher, gleich starke Innervation vorausgesetzt, die Muskeln wirken.

Unabhängig von dieser Reihe von Bestimmungen, welche die mechanischen Momente der Aufgabe darstellen, sind dann die Bewegungen der Augen, welche factisch ausgeführt werden, mittelst der Lageveränderungen der Netzhaut zu bestimmen, daraus zu berechnen, um welche Axen die Bewegungen stattfinden und welchen Umfang die Bewegungen haben. Ferner wird zu untersuchen sein die Coordination der Bewegungen für die beiden Augen oder für »das Doppelgespann der Augen«, oder die Abhängigkeit des einen Auges von dem anderen, woraus sich Schlüsse auf die Innervationsverhältnisse des Doppelauges ableiten lassen. Hierbei ist zu berücksichtigen die Bewegung der Augen bei verschiedener Lage des Kopfes und Körpers im Raume. — Endlich werden diese gesammten Untersuchungen in dem Probleme gipfeln, welches Princip den Augenbewegungen zu Grunde liegt.

Diesem Programme für die Darstellung der Lehre von den Augenbewegungen geht nun die Frage voraus, was uns denn überhaupt veranlasst, die Augen zu bewegen, welche Motive zu den Augenbewegungen wir haben? Es ist schon an verschiedenen Stellen der früheren Abschnitte (u. A. § 60) darauf hingewiesen worden, dass wir das Bestreben haben, die Objecte deutlich zu sehen, und dass wir, da nur mit einer beschränkten Stelle der Netzhäute deutlich gesehen werden kann, diese auf das Object gerichtet werden muss — dass ferner, wenn ein

Object indirect gesehen wird und unsere Aufmerksamkeit erregt, sofort das Bestreben auftritt, das Object direct zu sehen, also unsere Gesichtslinien auf dasselbe zu richten, dass hierzu sogar ein gewisser Zwang vorhanden ist. Wir müssen, wie schon Hering (Die Lehre vom binocularen Sehen 1868, p. 23) auseinandergesetzt hat, in dem Streben, die Objecte deutlich wahrzunehmen, das Motiv zu den Augenbewegungen sehen. Wir unterlassen es, Augenbewegungen zu machen, wenn uns die Wahrnehmungen, welche wir mittelst indirecten Sehens machen, genügen, z. B. beim Gehen auf der Strasse, wenn unsere Aufmerksamkeit etwa auf ein abstractes Problem gerichtet ist, oder in einer Gesellschaft von Personen, welche uns augenblicklich nicht interessiren; sobald aber ein Object unsere Aufmerksamkeit erregt, tritt das Bestreben auf, dasselbe deutlich zu sehen, und damit das Bestreben, unsere Augen auf dasselbe zu richten. Dem Bestreben, ein Object deutlich zu sehen, geht also voraus die Erregung der Aufmerksamkeit auf dasselbe, es folgt ihm mit dem Zwange einer Reflexbewegung die Bewegung unserer Augen, deren Erfolg meistens sofort unserer Intention entspricht. Ausser der Erregung der Aufmerksamkeit bestimmen uns Bewegungen, welche wir mit unsern Gliedmaassen auszuführen beabsichtigen, zur vorherigen Ausführung von Augenbewegungen: um irgend ein Ziel zu treffen, um nach einer Stelle im Raume zu gelangen, fixiren wir dieses Ziel — oft ohne unsere Aufmerksamkeit, wenigstens unsere bewusste Aufmerksamkeit demselben zuzuwenden.

Die Motive zu den Augenbewegungen sind also nicht, wie gleichfalls Hering bemerkt hat, einfache Willensimpulse, zu welchen wir allerdings befähigt sind, die aber nur ausnahmsweise Augenbewegungen auslösen. Solche einfache Willensimpulse werden z. B. zu statuiren sein, wenn der Patient, auf die Aufforderung des Arztes, die Augen nach unten oder oben bewegt, oder der Physiologe eine Convergenzbewegung im Dunkeln macht, um irgend etwas Subjectives zu beobachten und dergleichen. Das sind aber offenbar Ausnahmen — die Regel ist, dass den Bewegungen Gesichtseindrücke voraufgehen, welche nicht den Willensimpuls, sondern die Bewegung auslösen, und zwar eine Bewegung von bestimmter Richtung und Grösse. — Die Augenbewegungen sind in dieser Beziehung sehr ähnlich den Bewegungen unserer Stimm- und Sprachorgane: eine Vorstellung, eine Empfindung erregt nicht den Willen, eine Bewegung mit dem Kehlkopfe u. s. w. zu machen, sondern einen Innervationsapparat von ganz bestimmter Construction — das Gewollte ist nicht die Bewegung, sondern der Ton oder das Wort.

§ 68. Bestimmung des Drehpunktes. — Wenn die Bewegungen des Auges nur um einen Punkt stattfinden sollen, so ist erforderlich 1) dass Bewegungen, bei denen eine Verschiebung des ganzen Bulbus, d. h. eine Verschiebung sämmtlicher Punkte des Bulbus in einer Richtung stattfindet, nicht vorkommen, 2) dass die Gelenkflächen Kugelflächen von gleichem Radius sind. Beides ist nicht genau nachgewiesen. Im Gegentheil geht aus den sogleich zu besprechenden Untersuchungen J. J. Müller's (Untersuchungen über den Drehpunkt des menschlichen Auges. Diss. inaug. Zürich 1868, p. 17 und Archiv für Ophthalm. 1868, XIV. 3, p. 206) hervor, dass bei weiterer Oeffnung der Lidspalte, als sie normal stattfindet, der Bulbus aus der Orbita hervortritt, und zwar

bei Müller selbst um reichlich 1 Mm. Da diese Bewegung wahrscheinlich au
einer Mitbewegung des oberen schiefen Augenmuskels mit dem stark wirkende
Augenlidheber und consecutiver Mitwirkung des unteren schiefen Augenmuskel
beruht, so würde auch unter andern Umständen der Fall möglich sein, dass bein
Zusammenwirken dieser beiden Muskeln der Bulbus aus der Orbita hervorgezoge
würde. — Weiteres scheint indess hierüber nicht bekannt zu sein, und Mülle
selbst findet bei normaler Oeffnung der Lider keine Verschiebungen sämmtliche
Punkte des ganzen Augapfels. Wir nehmen bei diesem Stande der Untersuchun
als das einfachste für die normalen Bewegungen an, dass eine Bewegun
sämmtlicher Punkte des Augapfels in irgend einer Richtung nich
stattfindet.

Bei der Weichheit und Gleichmässigkeit des Fettpolsters der Augenhöhle is
es wahrscheinlich, dass dasselbe als Pfanne stets eine der Convexität des Aug
apfels entsprechende Concavität bildet, und wenn der Bulbus an seiner hintere
Fläche, so weit sie für die Bewegungen des Auges in Betracht kommt, eine Kugel
fläche darstellt, so würde auch die Gelenkpfanne als eine solche angesehen werde
können. Für das emmetropische Auge darf diese Annahme wohl gemacht wer
den, dagegen nicht für das myopische Auge, wo diese Fläche ellipsoidisch ist
(Donders, Anomalien der Refraction etc. 1866, p. 311.) Bei dem emmetropische
Auge würden also die für die normalen Bewegungen in Betracht kommende
Flächen nahezu Kugelflächen und der Mittelpunkt der Kugel nothwendig der Dreh
punkt derselben sein.

Der Drehpunkt des Auges würde also bestimmt werden können durc
Messung der hinteren Krümmungsfläche des Bulbus. Da die Messungen an aus
geschnittenen Augen mit vielerlei Fehlern behaftet sein müssen, so hat man au
anderem Wege den Drehpunkt des Auges zu ermitteln gesucht, indem ma
entweder die Bewegungen eines Punktes der Hornhaut, oder die Bewegungen de
Netzhaut, oder beides zugleich beobachtete.

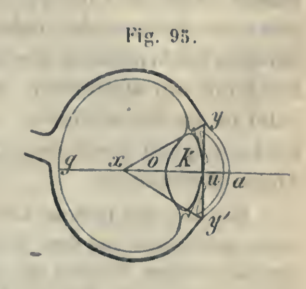
Die erste Methode ist von Junge (Helmholtz, Physiolog. Optik p. 458), so wi
von Donders und später modificirt von Donders und Doyer (Donders, Anomalie
der Refraction p. 156) angewendet worden. Junge beobachtete mittelst des Oph
thalmometers, um wieviel sich die Lichtreflexe beider Hornhäute einander näher
ten, wenn die Gesichtslinien aus paralleler Stellung in einen bestimmten Conver
genzwinkel übergingen, indess wirkte die Ellipticität der Hornhaut störend au
die Berechnung der gewonnenen Resultate. Aehnlich war die erste Methode vo
Donders.

Später hat Donders eine Methode ersonnen, bei welcher es nicht nöthig ist
auf die Form des elliptischen Hornhautschnittes Rücksicht zu nehmen, und in
Verein mit Doyer Messungen an einer grossen Anzahl von Augen angestellt. Di
Methode ist kurz in Bd. III. p. 222 dieses Handbuches angegeben. Man bestimm
darnach, wie gross die Bewegungswinkel sein müssen, um die beiden Endpunkt
des gemessenen horizontalen Durchmessers der Hornhaut mit ein und demselbe
Punkte im Raume zusammenfallen zu lassen.

Hat man mittelst des Ophthalmometers nach § 4 den horizontalen Durchmesser der Horn
hautbasis und den Winkel zwischen der Gesichtslinie und der Hornhautaxe (Winkel α s. §
und 5) bestimmt, und ist das Auge so gestellt, dass seine Hornhautaxe mit der Ophthalmo
meteraxe zusammenfällt, so wird vor dem Auge ein Ring mit einem feinen Haare angebracht

welches den Hornhautreflex deckt. Nun wird das Auge unter Betrachtung eines zu verschiebenden Visirzeichens um so viele Grade gedreht, dass statt des Hornhautreflexes der eine Cornealrand von dem feinen Haare gedeckt wird, und darauf so, dass der andere Cornealrand gedeckt wird. Die erhaltene Anzahl von Graden entspricht dem Winkel, welchen das Auge aus dem Bewegungscentrum beschrieben hat. Dieser Winkel betrug im emmetropischen Auge ungefähr 56°. Aus dem halben Durchmesser der Hornhautbasis und der Hälfte des Gesammtbewegungswinkels findet man dann die Entfernung des Bewegungscentrums von der Hornhautbasis gleich dem Product aus dem halben Durchmesser der Hornhautbasis in die Cotangente des halben Gesammtbewegungswinkels. Ist in Figur 95 ga die Hornhautaxe, yy' der Durchmesser der Hornhautbasis, yxy' der gefundene Gesammtbewegungswinkel, so wird das gleichschenklige Dreieck yxy' durch ux in zwei gleiche rechtwinklige Dreiecke getheilt, in welchen $ux = uy \cdot \text{cotang}\, u\hat{x}y$ ist. Addirt man zu ux noch die Hornhauthöhe ua, so findet man ax als die gesuchte Entfernung des Drehpunktes von dem Hornhautscheitel.

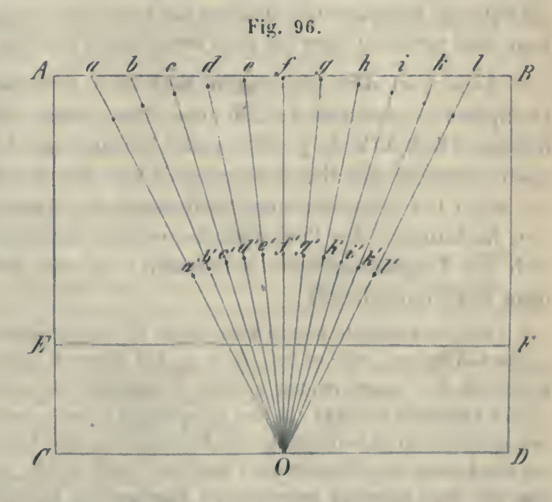
Fig. 95.



Donders und Doyer haben diese Entfernung des Drehpunktes vom Hornhautscheitel in 15 Bestimmungen emmetropischer Augen von Männern gefunden im Mittel = 13,6 Mm.; max. = 14,04 Mm., min. = 13,03 Mm. Bei einer mittleren Länge der Augenaxe von 22,3 Mm. würde mithin der Drehpunkt etwa 8,7 Mm. von der Netzhaut und ungefähr 10 Mm. von der hintern Fläche der Sklera entfernt liegen, also etwa 2 Mm. hinter der Mitte der Sehaxe; Donders berechnet nur 1,77 Mm. hinter der Mitte der Sehaxe.

Grösser fanden Donders und Doyer die Entfernung des Drehpunktes von dem Hornhautscheitel bei Myopen, nämlich = 14,52 Mm., kleiner für Hypermetropen, nämlich = 13,22 Mm. — Woinow (Arch. f. Ophthalm. XVI. 1, p. 250) fand nach dieser Methode für seine Augen als Abstand des Drehpunktes von der Hornhautbasis 11,37 Mm., die Höhe der Hornhaut 2,6 Mm., also für die Entfernung des Drehpunktes von dem Hornhautscheitel 13,97 Mm., was den Donders-Doyer'schen Werthen sich bestätigend anschliesst.

Fig. 96.



Volkmann (Berichte der Leipziger Akademie 1869, p. 28) und vielleicht vor ihm Schljachtin (Woinow, Archiv f. Ophthalm. XVI. 1, p. 245) ging von dem Gedanken aus, dass, wenn der Drehpunkt bei den Bewegungen des Auges unverändert bliebe, Doppelobjecte auf Radien eines Kreises aufgestellt, in dessen Mittelpunkt sich der Drehpunkt des Auges befände, sich bei allen Bewegungen des Auges decken müssten.

Werden auf einer Tafel, Figur 96, von dem Punkte O aus Radien gezogen und an deren Endpunkten $a, b, c \dots g$, ebenso auf den Radien an den Punkten $a', b', c' \dots g'$ feine Nadeln aufgesteckt, dann das Stück der Tafel $CEDF$ abgeschnitten und bei sorgfältig fixirtem Kopfe die Tafel so vor das eine Auge gebracht, dass die Linie ff' mit der Gesichtslinie zusammenfällt, so findet sich bei gewisser Stellung der Tafel eine Lage des Auges zu derselben, wo bei jeder beliebigen Blickrichtung die beiden in einer Visirlinie gelegenen Nadeln sich decken. Das kann nur stattfinden, wenn der Drehpunkt sich in O befindet. Bei Lage der Tafel in der horizontalen, so wie in der sagittalen Ebene des Auges blieben die Deckungsphänomene dieselben: es giebt also einen constanten Drehpunkt für die Augenbewegungen.

Den Ort des Drehpunktes bestimmte Volkmann ähnlich wie Donders aus der Grösse der Sehne des Bogens und dem Winkel desselben, da der Quotient aus der halben Sehne in den Sinus des halben Winkels den Radius des Bogens ergiebt. Volkmann bestimmte die Länge des Weges, welchen der Mittelpunkt der Pupille bei einer Drehbewegung des Auges um einen bestimmten Winkel durchläuft, mit Hülfe eines Fernrohrs mit Ocularmikrometer aus einer Entfernung von 3 M. bei etwa 25facher Vergrösserung; er fand als Totalmittel aus 43 Beobachtungen an 10 Personen für horizontale und verticale Drehungen für die Entfernung des Drehpunktes von der Pupille 11,01 Mm. (max. 12,1 — min. 9,6 Mm.). Addirt man hierzu als Entfernung des Hornhautscheitels von der Pupille den Donders'schen Werth von 2,36 Mm., so würde der Volkmann'sche Werth von 13,37 Mm. für die Entfernung des Drehpunktes von dem Hornhautscheitel nur wenig von dem Donders-Doyer'schen Mittelwerthe (13,6 Mm.) differiren.

Eine der Volkmann'schen ähnliche Methode benutzte Woinow (Arch. f. Ophthalm. 1870, XVI. 1, p. 247); — sie ist beschrieben in Bd. III. 1, p. 231 dieses Handbuchs — und fand den Drehpunkt seines rechten Auges 14,0 Mm., seines linken Auges 14,1 Mm. von dem Hornhautscheitel entfernt. Da Woinow's Augenaxe bis zur empfindenden Netzhautschicht 21,826 Mm. beträgt, so würde der Abstand des Drehpunktes vom hinteren Pole des Auges nur 7,8543 Mm. betragen, also 2,56 Mm. hinter dem Mittelpunkte der Augenaxe liegen. In sehr einfacher Weise wies Woinow das Vorhandensein eines constanten Drehpunktes nach, indem er durch ein Netz von quadratischen Maschen auf eine Tafel mit proportionalen Quadraten visirte, und fand, dass sich die Linien bei allen Bewegungen deckten.

Eine von den bisherigen Methoden verschiedene Art der Bestimmung des Drehpunktes wendete J. J. Müller (Diss. inaug. Zürich 1868 und Arch. f. Ophthalmologie 1868, XIV. 3, p. 183) unter Leitung von A. Fick an: er bestimmte den Ort, nach welchem der Hornhautscheitel von der Netzhaut desselben Auges hin projicirt wird bei verschiedenen Stellungen des Auges und fand aus diesen Orten und den Richtungen der Projectionslinien durch Construction den Punkt, in welchem sich die Projectionslinien schneiden, so wie die Entfernung dieses Punktes von dem Hornhautscheitel.

Müller benutzte hierzu zwei unter 45° gegen einander geneigte Planspiegel (nicht »prismatische« Spiegel, wie es Bd. III. 1, p. 230 dieses Handbuches heisst), von denen der eine das Profilbild des Auges in den zweiten Planspiegel so reflectirt, dass das Auge in diesem sein eignes Profilbild erblickt; in den Spiegeln ist je eine senkrechte Linie durch die Folie gekratzt, mit welcher der Scheitelpunkt der Hornhaut in dem Bilde zusammenfallen muss; der Punkt, wo die Linien den Scheitelpunkt tangiren, wird in eine bestimmte Entfernung projicirt. Durch eine an dem Apparate unbeweglich angebrachte rechtwinklige Platte, welche zugleich den Fuss des Apparates bildet, wird auf einem mit Papier überzogenen horizontalen Zeichnenbrette der Ort der Projection des Hornhautscheitels und die Richtung desselben zur Gesichtslinie markirt durch zwei Linien, nachdem der Apparat für das Auge den Bedingungen gemäss ein-

estellt worden ist. Darauf wird das Auge bewegt, der Apparat wiederum eingestellt und auf lem Zeichnenbrette die neue Lage und Richtung der Projection markirt u. s. w. Man erhält uf diese Weise eine Anzahl rechter Winkel auf dem Papier verzeichnet, deren eine Linie die rojectionslinie ist, welche unter einem rechten Winkel von der andern Linie an dem Orte der rojection geschnitten wird. Treffen die Verlängerungen der Projectionslinien in einem unkte zusammen, so ist dies der Drehpunkt, um welchen die Bewegungen erfolgten. Da die Entfernung des Ortes der Projection des Hornhautscheitels in einem durch den Apparat selbst egebenen Verhältnisse zu dem wirklichen Orte des Hornhautscheitels steht, so ergiebt die bmessung auf der Projectionslinie zugleich die Entfernung der von dem Hornhautscheitel in len verschiedenen Lagen des Auges durchlaufenen Punkte von dem Drehpunkte.

J. J. Müller fand, wie oben erwähnt, bei dieser Versuchsmethode die auffallende, auch später von Donders (Arch. f. Ophthalm. 1871, XVII. 1, p. 99) und Berlin (ebenda XVII. 2, p. 190) auf andere Weise bestätigte Thatsache, dass bei sehr weiter Oeffnung der Lidspalte der Augapfel aus der Augenhöhle nach vorn tritt, also eine Bewegung sämmtlicher Punkte des Augapfels in ein und derselben Richtung stattfinden kann. Er fand ferner bestätigend, dass bei Bewegung des Blickes in der Blickebene (Visirebene) der Augapfel sich um einen festen Punkt dreht, welcher bei ihm (Myopie $^1/_{10}$) für sein rechtes Auge im Mittel von über 100 Einzelbestimmungen = 13,19 Mm., für ein linkes Auge 14,56 Mm. betrug, bei gerader Haltung des Kopfes und Bewegung der Blickebene im Horizont des Kopfes. Ausserdem fand er eine andere Lage des Drehpunktes bei gehobener und gesenkter Blickebene: bei um 20° gehobener Blickebene ergab sich nämlich für das rechte Auge kaum abweichend 13,29 Mm. für die Entfernung des Drehpunktes vom Hornhautscheitel, für sein linkes Auge dagegen 15,16 Mm. und bei um 20° gesenkter Blickebene für das rechte Auge 12,87 Mm., für das linke 14,34 Mm. Das Zurücktreten des Drehpunktes leitet Müller aus der mit der Hebung der Blickebene verbundenen stärkeren Oeffnung der Lidspalte ab.

Zu ganz bestätigenden Resultaten gelangte Berlin (Arch. f. Ophthalm. 1871, XVII. 2, p. 158) nach einer andern, früher schon von Volkmann (Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes 1836, p. 35) benutzten, aber vervollkommneten Methode, indem er die scheinbare perspectivische Verschiebung ungleich weit vom Auge entfernter Objecte beim directen und indirecten Sehen bestimmte, und daraus die Entfernung des in der Pupillarebene gelegenen Kreuzungspunktes der Visirlinien von dem Drehpunkte des Auges berechnete.

Sind in Figur 97 N und W Punkte, auf welche visirt wird, ist ferner V ein leuchtender Punkt, auf welchen mittelst indirecten Sehens visirt, und welcher durch ein kleines in L aufgestelltes Object dabei verdeckt wird, so werden sich die beiden Visirlinien in dem Mittelpunkte der Pupillarebene schneiden. Wird nun das Auge so bewegt, dass es direct auf den Punkt V blickt, so ist derselbe von L nicht mehr verdeckt, sondern das verdeckende Object muss nach R geschoben werden, wenn es den Punkt V verdecken soll; ebenso wird der indirect gesehene Punkt W nicht mehr von N verdeckt, sondern das Object muss nach K geschoben werden, wenn dies der Fall sein soll. Es ergiebt sich daraus eine Entfernung von dem Pupillencentrum p zu dem Bewegungscentrum $o = op$. Denn aus der Aehnlichkeit der Dreiecke WVo und NRo, so wie der Dreiecke WVP und LNP ergiebt sich

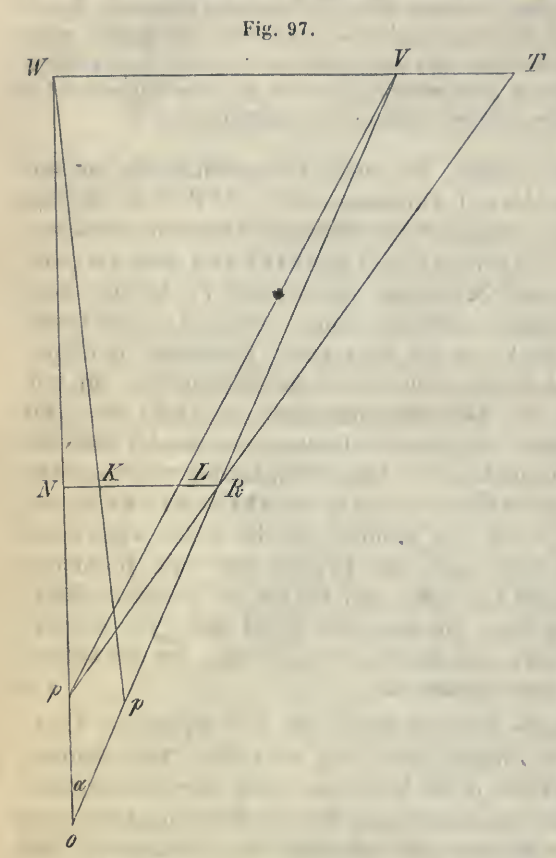
$$op = \frac{WN \cdot WV \cdot LR}{(WN - NL)\,(WV - NL - LR)}$$

Der Winkel α, um welchen sich das Auge gedreht hat, findet sich aber aus

$$\tang \alpha = \frac{WV - NR}{WN}.$$

Da die Grössen der Linien WV, WN u. s. w. sämmtlich gemessen sind, so findet sich daraus die Entfernung des Drehpunktes von dem Pupillarcentrum.

Fig. 97.



Der Apparat besteht in der Hauptsache aus zwei sich deckenden sehr feinen Nadeln, einem leuchtenden Punkte in V und einer kleinen Platte welche frei eingestellt werden kann so dass der leuchtende Punkt verdeckt wird. Selbstverständlich muss der Kopf sicher fixirt sein, ebenso der Apparat zur Messung.

Berlin fand für sein linkes, $^1/_{30}$ myopisches Auge bei Bewegung der Gesichtslinie im Horizonte des Kopfes den Drehpunkt im Mittel 14,41 Mm. von dem Hornhautscheitel, bei um 22° gehobener Blicklinie 14,81 Mm., bei um 20° gesenkter Blicklinie 14,32 Mm. entfernt. Etwas grösser sind die Differenzen für Berlin's rechtes Auge mit Myopie $^1/_{14}$. — Aus weiteren Untersuchungen Berlin's ergiebt sich, dass bei horizontalen Bewegungen keine Bewegung des ganzen Augapfels in einer Richtung erfolgt, wohl aber, dass bei verticalen und bei diagonalen Bewegungen Verschiebungen des ganzen Augapfels nach vorwärts und nach rückwärts erfolgen, so dass also nur für die horizontalen Bewegungen ein constanter Drehpunkt des Auges vorhanden ist. Die Verschiebungen des Augapfels leitet Berlin von Wirkungen des *M. levator palpebrae sup.* und der *Mm. obliqui* ab.

Wir müssen indess hervorheben, dass J. J. Müller Myop $^1/_{10}$ auf beiden Augen, Berlin Myop auf dem rechten Auge $^1/_{30}$, auf dem linken Auge $^1/_{14}$ ist, und dass die beobachteten Verschiebungen des ganzen Bulbus nur etwa 0,5 Mm. betragen. Es wird daher für die meisten Untersuchungen über Augenbewegungen erlaubt sein, einen nahezu constanten Drehpunkt des Auges anzunehmen, welcher im Mittel etwa 13,5 Mm. von dem Hornhautscheitel bei emmetropischen Augen entfernt ist.

§ 69. Wirkung der Augenmuskeln. — Abgesehen von den im vorigen Paragraph angeführten kleinen Verschiebungen des Augapfels in Folge von stärkeren

Bewegungen der Augenlider und von Verschiebungen desselben in Folge stärkerer oder schwächerer Füllung der Blutgefässe in der Augenhöhle sind die Bewegungen des Augapfels im Wesentlichen nur Drehungen; diese Drehbewegungen werden ausgeführt durch die Zusammenziehungen der sechs Augenmuskeln. Ihre Wirkung auf den Augapfel ist abhängig von der Richtung, in welcher sie ziehen, und von der Grösse ihrer Verkürzung und ihrem Volumen. Die Richtung, in welcher sie wirken, hängt ab von dem Orte, an welchem sie sich am Augapfel und an den Wandungen der Augenhöhle ansetzen. Unter der Annahme eines constanten Drehpunktes kann ihre Wirkung in Bezug auf Drehungen des Augapfels nur in einer durch den Drehpunkt und ihren Ansatz an den Bulbus gelegten Ebene, der Muskelebene erfolgen, zu welcher die Drehungsaxe normal ist. Wir haben also für die 6 Augenmuskeln 6 Muskelebenen mit zugehörigen, zu ihnen rechtwinkligen Drehungsaxen, wenn wir annehmen: 1) dass jeder Muskel sich nicht partiell, mit einzelnen Bündeln, sondern immer total contrahirt; 2) dass sich während seiner Contraction die Richtung, in welcher er wirkt, nicht verändert. Unter diesen Annahmen können wir den Ansatz des Muskels am Augapfel und seinen Ursprung von den Wandungen der Augenhöhle auf einen Punkt, den Mittelpunkt des Ansatzes, bezw. des Ursprunges reduciren: diese beiden Punkte und der Drehpunkt des Augapfels bestimmen dann die Lage der Muskelebene für jeden Grad der Zusammenziehung des Muskels.

Bestimmungen dieser Muskelebenen sind unter den erwähnten Annahmen von Fick (Zeitschrift für rationelle Medicin 1854, Neue Folge Bd. IV. p. 101), Ruete (Ein neues Ophthalmotrop 1857, p. 8) und am ausgedehntesten und genauesten von Volkmann (Berichte der Leipziger Akademie 1869, p. 45) gemacht worden. Alle drei Beobachter bestimmten den Ursprungs- und Ansatzpunkt jedes Muskels in Bezug auf ein rechtwinkliges Coordinatensystem in der Augenhöhle und im Augapfel, dessen Anfangspunkt mit dem Drehpunkte zusammenfällt. Die x-Axe desselben liegt in der Verbindungslinie der beiden Drehpunkte oder dem transversalen Durchmesser des Augapfels, die y-Axe fällt mit der Gesichtslinie (Sehaxe, Blicklinie) zusammen, die z-Axe steht vertical auf der Ebene, welche durch die xy-Axen bestimmt ist. Das Coordinatensystem des Augapfels fällt mit dem Coordinatensystem der Augenhöhle bei derjenigen Augenstellung zusammen, bei welcher die Gesichtslinien parallel gerichtet sind und bei aufrechter Stellung und gerader Kopfhaltung horizontal liegen: diese Lage bezeichnet Volkmann als die Normalstellung des Auges. Ferner nehmen alle Beobachter denjenigen Theil der x-Axe, welcher nach aussen (lateral) vom Drehpunkte gerichtet ist, als positiv, desgleichen den Theil der y-Axe, welcher nach hinten, und den Theil der z-Axe, welcher nach oben gerichtet ist.

Volkmann fand zunächst in 60 Beobachtungen die Distanz der beiden y-Axen oder der beiden Drehpunkte von einander im Mittel 63,5 Mm.; er betrachtet ferner den Augapfel als eine Kugel von 12,25 Mm. Radius; die Distanz der Ursprungsstellen der geraden Augenmuskeln in der Augenhöhle bis zum Drehpunkte = 31,76 Mm. (für den R. externus = 34 Mm., für den R. internus = 30 Mm.); die Distanz der beiden Ursprungsstellen (am *Foramen opticum*) von einander = 29,1 Mm., woraus sich die Distanz der Ursprungsstellen von der y-Axe etwa = 16 Mm. ergiebt; auf die x-Axe bezogen würde also, da die Ursprungsstelle nach innen (medianwärts) vom Drehpunkte gelegen ist, die Distanz auf der

x-Axe = 16 Mm. betragen; endlich auf der z-Axe würde die Ursprungsstelle = 0,6 Mm. sein, d. h. ein wenig über der Horizontalebene des Auges liegen. Ferner würde nach VOLKMANN die y-Axe etwa mitten inne zwischen dem äussern und innern Orbitalrande gelegen sein und beinahe auch mitten zwischen dem oberen und unteren Orbitalrande, nämlich vom oberen 16,7 Mm., vom unteren 17,2 Mm., die x-Axe aber beinahe mit der Verbindungslinie der beiden äussern Orbitalränder zusammenfallen, da sie nur 0,64 Mm. hinter der Verbindungslinie liegt. Indem wir bezüglich der Ursprünge der *Mm. obliqui* auf VOLKMANN verweisen, geben wir in der folgenden Tabelle XXV nach VOLKMANN eine Uebersicht der Ordinaten der Ursprünge und Ansätze der Augenmuskeln in Bezug auf die positiven x-y- und z-Axen, indem wir noch bemerken, dass VOLKMANN (l. c. p. 46) die Ansätze der oberen und unteren geraden Augenmuskeln in die Sagittalebene, der innern und äussern geraden Augenmuskeln in die Horizontalebene des Augapfels fallend annimmt. — VOLKMANN's Zahlen weichen nicht unerheblich von denen FICK's und RUETE's ab, scheinen aber die zuverlässigsten zu sein.

Tabelle XXV. (VOLKMANN.)

Muskeln.	Ursprünge.			Ansätze.		
	x	y	z	x	y	z
Rectus superior	— 16	31,76	3,6	0	— 7,63	10,48
- inferior	— 16	31,76	— 2,4	0	— 8,02	— 10,24
- externus	— 13	34,0	0,6	10,08	— 6,50	0
- internus	— 17	3,0	0,6	— 9,65	— 8,84	0
Obliquus superior	— 15,27	— 8,24	12,25	2,90	4,41	11,05
- inferior	— 11,1	— 11,34	— 15,46	— 8,71	7,18	0

Aus diesen Zahlen lassen sich nun die Lagen der Muskelebenen und damit zugleich die Lagen der normal zur Muskelebene liegenden Drehungsaxen in Bezug auf die Coordinatenaxen bestimmen. Wir folgen dabei im Ganzen der Ableitung, welche FICK (l. c. p. 112 u. f.) gegeben hat.

Man denke sich die Drehungsaxe durch die Muskelebenen halbirt; die Coordinaten ihrer Pole seien bezw. a, b, c und α, β, γ, und die Coordinaten der Ebene x, y, z. Die Abstände der beiden Pole von dem Punkte x, y, z sind nach dem Begriffe der Ebene einander gleich und die Quadrate derselben gleich $(x-a)^2+(y-b)^2+(z-c)^2=(x-\alpha)^2+(y-\beta)^2+(z-\gamma)^2$.

Hieraus ergiebt sich durch eine einfache Reduction die allgemeine Gleichung der Ebene, nämlich

$$(a-\alpha)x+(b-\beta)y+(c-\gamma)z = \tfrac{1}{2}(a^2+b^2+c^2-\alpha^2-\beta^2-\gamma^2)$$

allgemein $Ax + By + Cz = D$

oder $\frac{A}{D}x + \frac{B}{D}y + \frac{C}{D}z = 1.$

(Vergl. CAUCHY, Vorlesungen über die Anwendung der Infinitesimalrechnung auf die Geometrie. Deutsch von SCHNUSE 1840, p. 14 u. f. — BURG, Compendium der höheren Mathematik. Wien 1859, p. 382.)

Da es nun auf die Bestimmung der Lage der Drehungsaxe ankommt und diese durch den Coordinatenanfangspunkt geht, so wird an der Allgemeinheit der Betrachtung nichts geändert, wenn wir uns die Ebene vorläufig noch ausserhalb des Coordinatenanfangspunktes denken und den einen Pol der Axe in demselben. Dann ist

$$a = b = c = 0$$

und, wenn in Figur 98 die halbe Drehungsaxe OM mit p bezeichnet wird,

$$\alpha x + \beta y + \gamma z = \tfrac{1}{2}(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) = 2p^2.$$

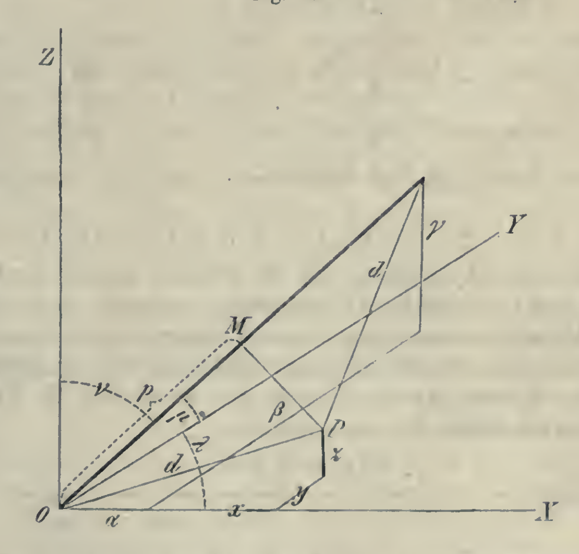
Die Winkel, welche die Drehungsaxe mit den drei Coordinatenaxen bildet, seien bezw. λ, μ, ν; dann ist

$$\cos\lambda = \frac{\alpha}{2p},\ \cos\mu = \frac{\beta}{2p},\ \cos\nu = \frac{\gamma}{2p}.$$

und wenn wir die sich hieraus ergebenden Werthe von α, β und γ in die Gleichung der Ebene substituiren

$$x \cdot \cos\lambda + y\cos\mu + z\cos\nu = p$$

Fig. 98.



wenn p den Abstand der Ebene vom Anfangspunkte des Coordinatensystems bezeichnet. Es ist nun für die Ebene

sowohl
$$x\frac{\cos\lambda}{p} + y\frac{\cos\mu}{p} + z\frac{\cos\nu}{p} = 1,$$

als auch
$$x\frac{A}{D} + y\frac{B}{D} + z\frac{C}{D} = 1,$$

folglich
$$\cos\lambda = p\frac{A}{D},\ \cos\mu = p\frac{B}{D},\ \cos\nu = p\frac{C}{D}$$

und wegen
$$\cos\lambda^2 + \cos\mu^2 + \cos\nu^2 = 1 = p^2\frac{A^2}{D^2} + p^2\frac{B^2}{D^2} + p^2\frac{C^2}{D^2}$$

ist
$$p = \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = \frac{D}{R}$$

und darnach

$$\cos\lambda = \frac{A}{R},\ \cos\mu = \frac{B}{R},\ \cos\nu = \frac{C}{R}$$

Die Werthe A, B, C und R ergeben sich nun weiter aus den festen Punkten der Ebene (x_u, y_u, z_u), (x_a, y_a, z_a), wobei die Indices u bezw. a die Coordinaten des Ursprunges bezw. des Ansatzes desselben Muskels bedeuten, — und der Bestimmung, dass die Ebene durch den Coordinatenanfangspunkt geht. In diesem Falle ist nämlich $p = 0$, und die allgemeine Gleichung der Punkte der Ebene

$$x \cdot \cos\lambda + y\cos\mu + z\cos\nu = 0 \qquad 1)$$

Also haben wir

$$x_u\cos\lambda + y_u\cos\mu + z_u\cos\nu = 0 \qquad 2)$$
$$x_a\cos\lambda + y_a\cos\mu + z_a\cos\nu = 0 \qquad 3)$$

und

$$\cos\lambda^2 + \cos\mu^2 + \cos\nu^2 = 1 \qquad 4)$$

Durch Auflösung der letzten 3 Gleichungen nach λ, μ und ν erhalten wir

$$\cos\lambda = \frac{y_a z_u - y_u z_a}{\sqrt{(y_a z_u - y_u z_a)^2 + (z_a x_u - z_u x_a)^2 + (x_a y_u - x_u y_a)^2}}$$

oder, wenn wir den Divisor $= R$ setzen

$$\cos\lambda = \frac{y_a z_u - y_u z_a}{R} \quad \ldots\ldots \quad \text{I)}$$

und ebenso

$$\cos\mu = \frac{z_a x_u - z_u x_a}{R} \quad \ldots\ldots \quad \text{II)}$$

$$\cos\nu = \frac{x_a y_u - x_u y_a}{R} \quad \ldots\ldots \quad \text{III)}$$

Setzt man diese Werthe I, II, III in die Gleichung 1) ein, so erhält man als Gleichung der Muskelebene

$$(y_a z_u - y_u z_a)\,x + (z_a x_u - z_u x_a)\,y + (x_a y_u - x_u y_a)\,z = 0.$$

Die Winkel λ, μ, ν bezeichnen also die Winkel, welche die Drehungsaxen der Muskeln mit den rechtwinkligen Coordinatenaxen bezw. x, y, z bilden, wenn die positive x-Axe nach aussen, bezw. y nach hinten, z nach oben geht.

Volkmann hat diese Winkel mit Zugrundelegung der in Tabelle XXV. zusammengestellten Werthe berechnet nach den Formeln I) II) III) und die in Tabelle XXVI. verzeichneten Werthe erhalten.

Tabelle XXVI.

	λ	μ	ν
Rectus superior	150° 5′	113° 47′	107° 5′
- inferior	148° 7′	114°	71° 26′
- externus	90° 52′	91° 20′	1° 25′
- internus	89° 19′	90° 45′	1° 1′
Obliquus superior . . .	53° 46′	146° 42′	79° 15′
- inferior	50° 47′	140° 6′	83° 46′

Es ergiebt sich daraus für einen isolirt wirkenden Muskel gedacht die Richtung der Axe, um welche er dreht, in Bezug auf Aussen, Hinten und Oben, so wie Innen, Vorn und Unten, indem jeder Winkel unter 90° die ersteren Richtungen, jeder Winkel über 90° die zweiten entgegengesetzten Richtungen in Bezug auf die positiven festen Coordinatenaxen bedeutet. — (cf. Bd. VI. dieses Handbuches Capitel IX. p. 3.)

Es geht daraus hervor:

1) dass für keinen der 6 Muskeln die Drehungsaxe mit einer der Coordinatenaxen zusammenfällt, mithin die Drehung des Augapfels nach oben und unten, innen und aussen nur durch die combinirte Wirkung von wenigstens 2 Muskeln erfolgen kann;

2) dass die 3 Muskelpaare nicht directe Antagonisten sind, indem weder die Drehungsaxe des R. superior mit der des R. inferior, noch die des R. externus

mit der des R. internus und noch weniger die des Obliq. superior mit der des Obliq. inferior zusammenfällt. Gemeinschaftliche Drehungsaxen für die zugehörigen Muskelpaare sind also immer mit beträchtlichen Fehlern behaftete Fictionen.

Nur ganz ungefähr würde man annehmen können, dass die gemeinschaftliche Drehungsaxe für den R. sup. und infer. in der x-y-Ebene gelegen sei und mit der Sehaxe einen Winkel von ungefähr 66° bildete — dass die gemeinschaftliche Drehungsaxe für den R. extern. und intern. mit der z-Axe zusammfiele, endlich eine Drehungsaxe für die beiden Obliqui etwa um 8° gegen die x-y-Ebene geneigt wäre von aussen und oben nach innen und unten, gegen die Sehaxe aber nur etwa 37° von vorn und aussen nach hinten und innen verliefe.

Ausser von der Richtung der Muskeln ist die Wirkung, d. h. das Drehungsmoment derselben abhängig von ihrer Länge und ihrem Querschnitt. Auch hierüber hat Volkmann Messungen gemacht, aus denen sich ergiebt, dass die 4 Mm. recti eine ziemlich gleiche Länge im erschlafften Zustande, also in der Normalstellung des Augapfels, haben, nämlich ungefähr 40 Mm. — die Obliqui dagegen nur 32—34 Mm. lang sind. Der Querschnitt zeigt beträchtliche Differenzen: am dicksten ist der R. externus = 17,4 □Mm., R. extern. 16,7, R. infer. 15,8, R. super. 11,3, Obliq. sup. 8,4, Obliq. inf. 7,9 □Mm. — Die Kräfte der Muskeln sind also bei Voraussetzung gleichmässiger Innervationsstärke offenbar sehr verschieden für die einzelnen Muskeln, schon wenn es sich um eine Bewegung von der Normalstellung des Auges aus handelt; bei jeder andern Stellung wird, abhängig von dem schon vorhandenen Contractionszustande bezw. dem Drehungsgrade der Antagonisten, das Verhältniss noch viel verwickelter. Volkmann nimmt indess an, dass für manche Bewegungen des Auges »gewisse ungünstige Verhältnisse in der Lage der Drehaxen durch eine geeignete Vertheilung der Muskelkräfte compensirt werden können«, und z. B. eine Drehung um die Sehaxe aufgehoben werden könnte bei einem Zusammenwirken der beiden Obliqui und des oberen und unteren geraden Augenmuskels. (cf. Volkmann l. c. p. 69, Fick l. c. p. 125, Wundt, Arch. f. Ophthalm. 1862, VIII. 2, p. 40 u. f.)

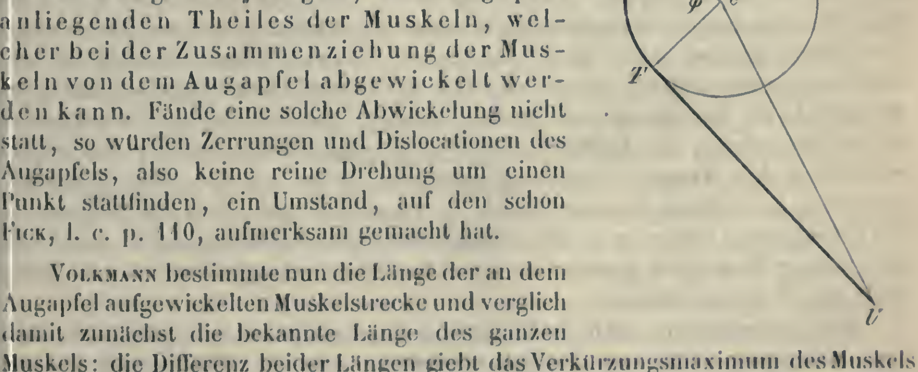


Fig. 99.

Noch ein wichtiger Umstand bei der Wirkung der Augenmuskeln auf die Bewegung des Augapfels ist hervorzuheben, nämlich die Grösse der Muskelverkürzung im Verhältniss zu der Länge desjenigen, dem Augapfel anliegenden Theiles der Muskeln, welcher bei der Zusammenziehung der Muskeln von dem Augapfel abgewickelt werden kann. Fände eine solche Abwickelung nicht statt, so würden Zerrungen und Dislocationen des Augapfels, also keine reine Drehung um einen Punkt stattfinden, ein Umstand, auf den schon Fick, l. c. p. 110, aufmerksam gemacht hat.

Volkmann bestimmte nun die Länge der an dem Augapfel aufgewickelten Muskelstrecke und verglich damit zunächst die bekannte Länge des ganzen Muskels: die Differenz beider Längen giebt das Verkürzungsmaximum des Muskels bei reiner Drehwirkung. Ist in Figur 99 A der Ansatz, U der Ursprung des

Muskels, AT die auf den Bulbus aufgewickelte Strecke, C der Drehpunkt, so ist $AT = r \cdot \text{arc.}\ \varphi$; UT ist direct messbar; $UT + AT$ ist die ganze Länge des Muskels $= L$ in der Normalstellung und AT die Grösse seiner Verkürzung $= \lambda$, daher $\frac{\lambda}{L}$ der Ausdruck für die Contractilität des Muskels. Die Augenmuskeln verkürzen sich nach VOLKMANN's Bestimmungen im Mittel nur um ein Viertel ihrer Länge, also nur halb so viel, wie die Skelettmuskeln nach WEBER's Untersuchungen (Berichte der Leipziger Akademie 1851, p. 63). Dann sind bei dieser geringen Verkürzung die Grössen des Winkels φ etwas grösser, als die am lebenden Menschen stattfindenden Winkelbewegungen der Augen fordern würden. Wir stellen, indem wir auf § 56 und § 74 verweisen, VOLKMANN's Zahlen für den Winkel φ mit den von ihm an lebenden Menschen bestimmten maximalen Bewegungen des Auges zusammen.

Tabelle XXVII. (VOLKMANN.)

$\angle \varphi$ als Maass der Augenbewegung.			Grösse der Augenbewegung am Lebenden.		
R. superior	41° 48′	83° 31′	Nach oben	35°	85°
- inferior	41° 43′		- unten	50°	
- internus	29° 31′	90° 14′	- innen	42°	80°
- externus	60° 43′		- aussen	38°	
Obl. super.	26° 55′	105° 13′	- oben innen	38°	84°
- infer.	78° 18′		- unten aussen	46°	
			- unten innen	44°	82°
			- oben aussen	38°	

Da die Normalstellung nicht gleichbedeutend ist mit der Primärstellung, von welcher aus wohl die Bewegungen an Lebenden ausgegangen sind, so werden wir nur die Summen der beiden Excursionen in ein und demselben Meridiane vergleichen können, und finden dann, dass die Abwickelung der Muskeln noch nicht ganz, aber doch fast vollständig stattfindet. Für die schiefen Augenmuskeln ist die Vergleichung der beiden Grössen wohl überhaupt etwas bedenklich.

Es wird nun jedenfalls nach der vollständigen Abwickelung des Muskels eine bedeutende Hemmung für weitere Zusammenziehung des Muskels durch die Befestigung desselben gesetzt werden, und darin ausser der von MERKEL (I. 1, p. 59 dieses Handbuches) hervorgehobenen Hemmungsvorrichtung auch eine Hemmungsvorrichtung gegeben sein. Es ist aber gegen VOLKMANN's Berechnungen der Abwickelungsgrösse geltend zu machen, dass der Augapfel keine Kugel ist, um deren Mittelpunkt die Bewegungen stattfinden, sondern, dass der Drehpunkt viel weiter nach hinten gelegen ist; die Werthe für $\angle \varphi$ würden also sämmtlich etwas grösser werden, so dass MERKEL's Hemmungsvorrichtung schon vor der vollständigen Abwickelung zur Geltung kommen würde. — Ausserdem würde für die Bestimmung des Verhältnisses von $\angle \varphi$ zu den factisch stattfindenden Bewegungen wohl kaum ein einziger Muskel bei Ausführung einer Bewegung in irgend welcher Richtung allein zur Wirkung kommen.

Die Untersuchung der Betheiligung der einzelnen Muskeln an der Ausführung einer Bewegung wird noch dadurch erschwert, dass die Widerstände für eine bestimmte Bewegung nicht zu bestimmen sind: weder die durch die Bindege-

websbefestigung, noch die durch die Elasticität des Opticusstieles, noch die durch den Antagonismus der Muskeln gesetzten Widerstände sind bekannt. HERING (Lehre vom binocularen Sehen p. 112) sagt daher: »die Halbaxe des Drehbestrebens eines Muskels ist nicht nothwendig auch die Halbaxe der wirklichen Drehung, die er herbeiführt«. Indem wir daher von den Versuchen FICK's und WUNDT's, die einzelnen Antheile der Muskeln bei einer einfachen Bewegung zu berechnen, absehen, führen wir nur die Muskelcombinationen an, welche bei Drehungen um die verticale Axe und die horizontale Queraxe hauptsächlich in Betracht kommen dürften. Für die Bewegung

nach innen (Convergenzbewegung): R. internus (R. super., Obl. infer.),
nach aussen (Divergenzbewegung): R. externus (Obliq. super.),
nach oben (Hebung): R. superior und Obliq. inferior,
nach unten (Senkung): R. inferior und Obliq. superior.

Zu einer schematischen Veranschaulichung der Augenmuskelwirkungen dienen die Ophthalmotrope. Das erste Ophthalmotrop wurde von RUETE (Das Ophthalmotrop 1846, abgedruckt aus den Göttinger Studien 1845) construirt und später von ihm (Ein neues Ophthalmotrop 1857) vervollständigt. Die Augäpfel, durch Holzkugeln mit einer Röhre, welche vorn mit einer Linse, hinten mit einer matten Glasplatte und mit verticalem und horizontalem Meridiane versehen sind, repräsentirt, werden mit der Hand eingestellt und die nach Ansatz und Ursprung auf Grund der Messungen von RUETE dargestellten, durch Fäden repräsentirten Muskeln zeigen dann an einer Skala die ihnen bei einer bestimmten Bewegung ertheilten Verschiebungen, entsprechend den Contractionen und Dehnungen derselben. Ein vereinfachtes Modell des Ophthalmotrops wurde von KNAPP angegeben; es ist beschrieben und abgebildet von HELMHOLTZ (Physiologische Optik p. 526, Figur 168). Ein anderes Ophthalmotrop wurde von WUNDT (Arch. f. Ophthalm. 1862, VIII. 2, p. 88) construirt zur Erläuterung des von ihm aufgestellten Princips von der geringsten Anstrengung der Muskeln bei den Augenbewegungen. Durch Belastung der an dem Augapfel befestigten, die Muskeln repräsentirenden Fäden werden die Bewegungen des Augapfels herbeigeführt und durch Verschiebung von Skalen die Grösse des Muskelzuges controlirt.

Physiologie der Augenbewegungen.

§ 70. **Nomenclatur und Untersuchungsmethoden.** — Die bisherigen Erörterungen bilden nur eine Grundlage dafür, was für Bewegungen nach den anatomischen Verhältnissen physikalisch möglich sind — die weitere Frage ist nun, *welche von den möglichen Bewegungen des Augapfels werden wirklich ausgeführt?* Wir werden in der Folge finden, dass die den Zwecken des Sehens dienenden Augenbewegungen nur einen kleinen Theil der möglichen Augenbewegungen ausmachen, und dass ausserdem die Bewegungen des einen Auges fast ausnahmslos associirt sind mit den Bewegungen des anderen Auges — dass überhaupt die Augenbewegungen von einer nach bestimmten Gesetzen geordneten Innervation beherrscht und dirigirt werden.

Die Untersuchungen der Augenbewegung haben eine besondere Terminologie geschaffen, die zur Vermeidung von Wiederholungen und Missverständnissen in den Hauptsachen vorangeschickt werden soll. Da das Sehen mit bewegten Augen *Blicken* genannt wird, so hat man davon abgeleitet: *Blickpunkt*, ein Punkt, auf welchen man blickt, oder welchen man fixirt, daher gleichbedeutend mit Fixationspunkt; — *Blicklinie*, eine Linie, welche man sich vom fixirten Punkte durch den Drehpunkt des Auges gehend denkt, und welche zur Zeit noch als

identisch mit der Gesichtslinie angesehen werden muss. Sie ist zu unterscheiden von der Blickrichtung (s. § 60, Figur 79), welche Hering (Binoculares Sehen p. 4) binoculare Blicklinie nennt; — Blickebene ist eine durch die beiden Blicklinien oder Gesichtslinien gelegte Ebene, sie differirt nicht merklich von der Visirebene; — Blickfeld (Helmholtz, Physiol. Optik p. 461) ist das Feld oder die Fläche, welche der Blick oder die Blicklinie durchlaufen kann bei unbeweglich gedachtem oder gehaltenem Kopf und Körper. Davon zu unterscheiden ist der Blickraum (Hering, Binoc. Sehen p. 43) als die Gesammtheit der Punkte, welche bei ein und derselben Kopflage binocular fixirt werden können; — Blicklage bedeutet die Lage des Blickpunktes bezw. der Blicklinien.

Man reducirt ferner die Bewegungen auf die 3 Dimensionen des Raumes, oder auf ein rechtwinkliges Coordinatensystem und unterscheidet Erhebungen und Seitenwendungen des Blickes, misst die Grösse derselben nach dem Winkel, und hat also Erhebungswinkel (positiv bei Bewegung der Blickebene nach oben, negativ bei Bewegung nach unten) und Seitenwendungswinkel. Fick bezeichnet die Erhebungswinkel als Latitudo, den Seitenwendungswinkel als Longitudo im Anschluss an die geographischen Benennungen am Bulbus. (Moleschott's Untersuchungen zur Naturl. 1859, V. p. 200.) Ausserdem hat man Convergenzbewegungen bezw. Convergenzwinkel.

Die Seitenwendungen werden auch als gleichseitige Bewegungen bezeichnet und sind unsymmetrische Bewegungen, insofern dabei das eine Auge nach innen (medianwärts), das andere nach aussen (lateralwärts) bewegt wird — während die Convergenzbewegungen ungleichseitige und symmetrische Bewegungen sind. Die Erhebungen erfolgen um die x-Axe oder den transversalen Durchmesser, die Seitenwendungen um die z-Axe oder den verticalen Durchmesser des Auges. Endlich werden Bewegungen um die y-Axe oder um die Gesichtslinie oder Blicklinie als Rollungen mit Rollungswinkeln (Hering, Binoc. Sehen p. 72) bezeichnet. Wir kommen darauf in § 72 zurück. Hueck nannte diese Bewegungen »Axendrehungen«. (Hueck, Die Axendrehung des Auges, Programm Dorpat 1838.) Der Ausdruck »Raddrehung« bezieht sich nur auf die Verdrehung der Netzhautbilder, wenn dieselben auf eine ebene Fläche und nicht auf eine dem kugelförmigen Gesichtsfelde entsprechende Kugelfläche bezogen werden. (cf. Hering, Binoc. Sehen 1868, p. 67. — Donders, Archiv für Ophthalmologie 1870, XVI. 1, p. 167. — Schön, ibid. 1874, XX. 2, p. 172.)

Endlich ist es nothwendig, bei der Untersuchung der Augenbewegungen von einer bestimmten Stellung der Augen auszugehen, welche als Primärstellung von Listing (Ruete, Lehrbuch der Ophthalmologie 1854, I. p. 37 und Ein neues Ophthalmotrop 1857, p. 43) charakterisirt worden ist dadurch, dass von der Primärstellung der Blicklinien ausgehende reine Erhebungen oder reine Seitenwendungen keine Drehung um die Gesichtslinie hervorbringen. Bei dieser Primärstellung sind die Gesichtslinien parallel, die Lage der Blickebene und die Stellung des Kopfes aber individuell verschieden und durch Versuche zu ermitteln, wie wir in § 72 besprechen werden. Alle übrigen Stellungen werden Secundärstellungen genannt.

Die hier zu berücksichtigenden Kopfstellungen bezeichnet man nach DONDERS (Holländische Beiträge 1848, I. p. 127) folgendermassen: die gewöhnliche Stellung des Kopfes bei gerader Haltung ist die verticale Kopfstellung, die Bewegungen nach rechts und links sind Neigungen oder seitliche Neigungen, die Bewegungen nach vorn und hinten Beugungen.

Die Methoden, welche man zur Untersuchung der Augenbewegungen angewendet hat, beruhen fast alle auf der Beobachtung der Veränderungen, welche die Netzhautprojectionen in ihrer Lage gegen die Lage von festen Punkten im Raume erleiden. 1) Nur HUECK (l. c. p. 16) und controlirend TOURTUAL (Müller's Archiv 1840, p. XV) und DONDERS (l. c. p. 118) haben bestimmte Punkte der Iris oder Conjunctiva als Merkzeichen der Verschiebung bei Bewegungen des Auges und namentlich des Kopfes beobachtet. — 2) Die Beobachtung der Nachbilder von linearen Objecten wurde von RUETE (Lehrbuch der Ophthalmologie 1845, p. 14 und Ophthalmotrop 1846, p. 9) vorgeschlagen, von DONDERS (Holl. Beiträge 1848, p. 120) zur Methode entwickelt, und diese Methode später namentlich von HELMHOLTZ (Arch. f. Ophthalm. 1863, IX. 2, p. 173) sehr vervollkommnet. — 3) Beobachtung des Parallelismus oder der Neigung von Doppelbildern bei verschiedenen Stellungen des Kopfes und der Augen, von MEISSNER (Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1854, p. 11) zuerst angewendet, später von HERING (Binoculares Sehen 1868, p. 92) in vervollkommneter Form benutzt. — 4) Beobachtung der veränderten Lage der Purkinje'schen Aderfigur (MEISSNER, ibid. p. 76). — 5) Beobachtung der veränderten Lage des Mariotte'schen Fleckes von MEISSNER (ibid. p. 70) vorgeschlagen und von FICK (Moleschott's Untersuchungen 1859, Bd. V. p. 198) zu Messungen benutzt. — 7) Methode mit binocularen Bildern, welchen eine solche Lage gegeben wird, dass sie bei Parallelstellung der Gesichtslinien zu einem Bilde verschmelzen. Von HERING (Beiträge III. 1863, p. 71) angegeben, von VOLKMANN (Physiol. Unters. II. 1864, p. 236) und später von HERING (Binoc. Sehen p. 83) weiter ausgebildet.

Für alle diese Methoden ist von fundamentaler Wichtigkeit eine genaue Fixirung oder Controlirung der Kopfstellung. Hierfür wurde erst von HELMHOLTZ (Arch. f. Ophthalm. 1863, IX. 2, p. 173) gesorgt und eine sehr einfache und zweckmässige Vorrichtung angegeben, das in Figur 100 abgebildete Visirzeichen. Es besteht aus einem etwa 15 Ctm. langen Brettchen mit einem runden Ausschnitt, welcher, mit heissem Siegellack bedeckt, vor dem Erstarren des Siegellacks zwischen die Zahnreihen festgedrückt wird, bis der Siegellack erkaltet ist. Die Lage des Brettchens zum Kopfe ist dann immer unverrückbar dieselbe. Am andern Ende trägt das Brettchen eine kleine Säule, welche etwas über die Verbindungslinie der beiden Augenmittelpunkte emporragt, und an dieser ist ein beiderseits zugespitzter Papierstreifen oder Stab wagerecht befestigt von der Länge des Abstandes der beiden Knotenpunkte und so eingestellt, dass bei Parallelstellung der Gesichtslinien die Spitzen der

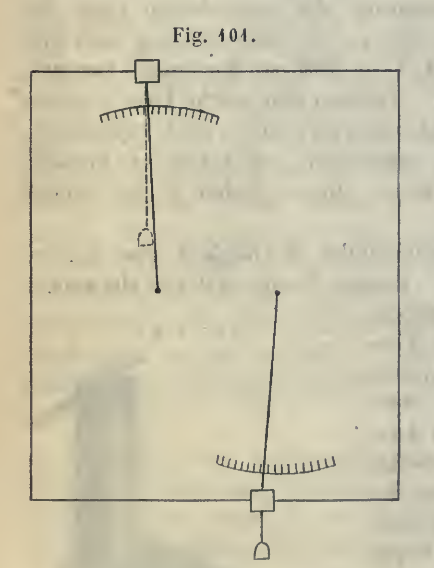
Fig. 100.



Doppelbilder des Stabes einander eben berühren, und bei Fixation eines fernen Punktes mit demselben zusammenfallen. Man kann also bei der Wiederaufnahme der Beobachtungen immer sicher sein, die frühere Stellung dem fixirten Punkte und den sonstigen zu beobachtenden Lineamenten gegenüber einzunehmen. Berthold (Archiv für Ophthalm. 1865, XI. 3, p. 107) hat an dem Brettchen des Helmholtz'schen Visirzeichens noch ein Pendel mit Gradbogen angebracht, um die Neigung des Kopfes oder der Visirebene messen zu können. Hering (Binoculares Sehen 1868, p. 78) hat statt des Visirzeichens einen Apparat construirt, durch welchen auch mittelst eines Zahnbrettchens der Kopf fixirt und verschieden eingestellt, dabei die jeweilige Stellung des Kopfes in Bezug auf Beugung abgelesen werden kann.

Was dann die bei diesen Methoden benutzten Beobachtungsobjecte und ihre Aufstellung betrifft, so benutzt man bei der Nachbildermethode lebhaft gefärbte verticale und horizontale Streifen (Donders, Helmholtz) oder die Grenzen zweier farbiger Flächen (Hering) an einer verticalen Wand und projicirt das Nachbild der Streifen oder der Grenzlinie auf Linien an der Wand, welche den Streifen parallel sind. Bei einer Entfernung der Streifen und der Wand von 6—7 Meter kann man die Gesichtslinien als annähernd parallel annehmen. — Bei der Methode mit Doppelbildern, welche hauptsächlich für Convergenzstellungen zu verwerthen ist, fixirt man einen etwa 10 bis 20 Mm. vor der feinen Linie, von welcher man Doppelbilder erhalten will, gelegenen Punkt aus einer Entfernung von 200 bis 300 Mm. und betrachtet die Objecte bei verschiedenen Augenstellungen, oder folgt den Bewegungen, welche man mit den Objecten macht, mit den Augen, indem man unverrückt den Fixationspunkt fixirt und dabei die Lage der indirect gesehenen Doppelbilder der Linie beachtet. — Bei der Methode mit binocularen Bildern bietet man jedem Auge eine feine verticale oder nach Umständen geneigte Linie, deren Mittelpunkte markirt sind, und um die Distanz der Augenmittelpunkte, oder bei Convergenzstellungen entsprechend weniger von einander entfernt sind, und beachtet, ob das Sammelbild der beiden Linien einfach ist, oder ob die Linien beim Zusammenfallen der markirten Punkte sich kreuzen — oder man bietet, wie in Figur 101, dem einen Auge eine von der Marke nach oben, dem andern Auge eine von der Marke nach unten verlaufende Linie (oder Faden) und beobachtet, ob beim Zusammenfallen der beiden Marken die Linien durch die Marke geknickt verlaufen, oder ob sie eine continuirliche Gerade bilden; die Linien können, wie die Figur zeigt, Winkel mit der Verticalen bilden, um zu einer continuirlichen Geraden vereinigt zu werden.

Fig. 101.

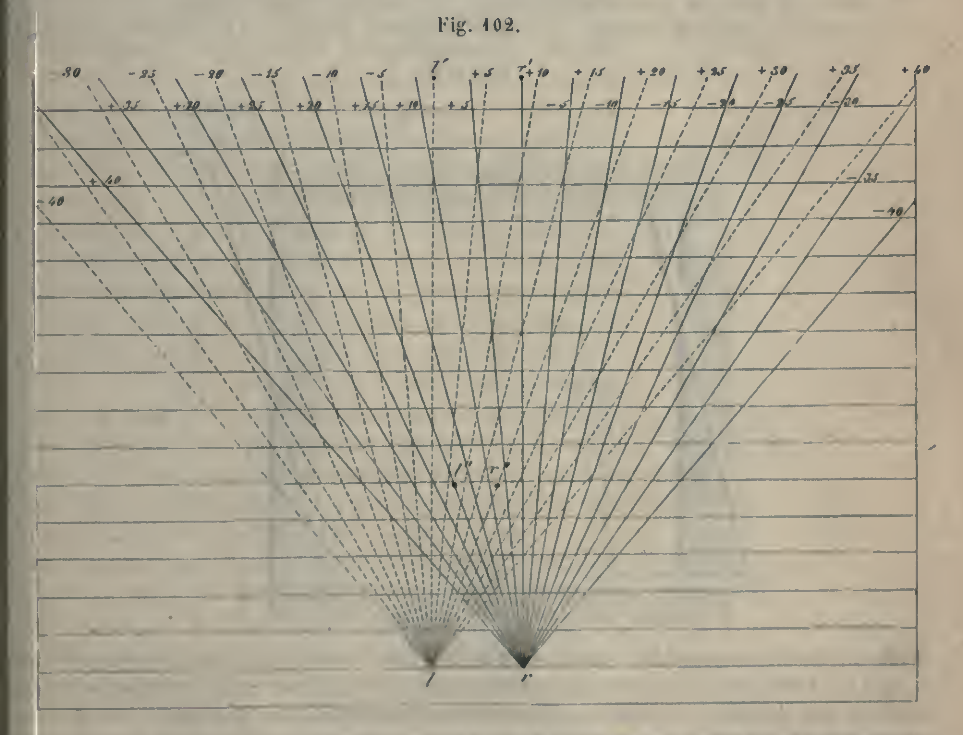


Der Apparat zur Beobachtung mit Nachbildern von Helmholtz (Archiv f. Ophthalm. 1863, IX. 2, p. 182) besteht aus einem mit grauem Papier überspannten Zeichnenbrett, auf

welches Vertical- und Horizontallinien gezogen sind; längs der Mitte der mittlen Verticallinie ist ein schmaler grüner Streifen auf der Mitte eines etwas breiteren rothen Streifens angebracht. In der Mitte des grünen Streifens, dem Schnittpunkte der verticalen und horizontalen Linie entsprechend, ist ein schwarzes Tüpfelchen zur Bezeichnung des Fixationspunktes angebracht. An dieser Mittelstelle ist ein kleines Glasspiegelchen unter den rothen Streifen geschoben: in den unbedeckten Stellen des Spiegelchens sieht das beobachtende Auge das Bild seiner Iris und Pupille und hat sich so zu stellen, dass das Pupillencentrum in einer auf der Ebene des Zeichnenbrettes Normalen liegt. Das Brett kann um diese Normale als Axe gedreht und eingestellt und Bewegungen des Blicks dem Streifen entlang gemacht werden, um die Stellung des Nachbildes zu beobachten.

Zur Untersuchung mit binocularen Bildern benutzte Hering (Binoculares Sehen p. 85) als Objecte für das eine Auge zwei vertical gespannte schwarze Rosshaare, für das andere Auge ein ebenso gespanntes weisses Rosshaar. Die beiden schwarzen Rosshaare sind an einem langen Messingstreifen befestigt, dessen Drehpunkt von jedem Haare um 1 Mm. auf jeder Seite entfernt ist; das weisse Rosshaar ist gleichfalls auf einem Messingstreifen befestigt und geht durch den Drehpunkt desselben hindurch; die beiden Drehpunkte liegen gerade den beiden Augen gegenüber, so dass sie bei parallel gerichteten Gesichtslinien in einen Punkt zusammenfallen. Die beiden Messingstreifen sind um ihre Drehpunkte drehbar und die Grösse ihrer Winkelverschiebung an einem graduirten Kreisbogen mit einem an dem Messingstreifen befestigten Nonius auf Minuten ablesbar. Aufgabe ist, die beiden schwarzen Haare so zu stellen, dass das weisse Rosshaar mitten zwischen ihnen und genau parallel zu ihnen erscheint. Die beiden Messingstreifen sind auf einer grauen Tafel angebracht. — Die Tafel kann auf einem Tische verschoben werden, welcher mit Lineamenten, wie in Figur 102, versehen ist: l und r

Fig. 102.



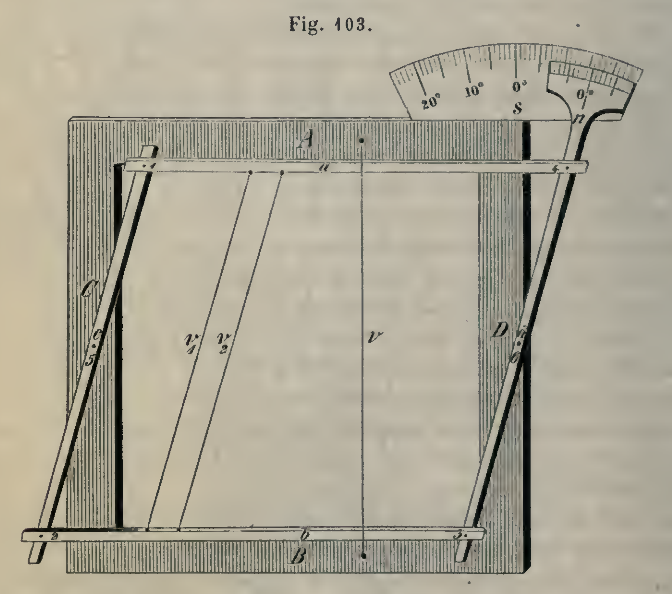
entsprechen den Drehpunkten des linken und rechten Auges, deren Gesichtslinien bei Parallelstellung in der Horizontalebene gleiche Richtung mit den Linien ll' und rr' haben. Die von

l und *r* ausgehenden radialen Linien dienen dazu, die Punkte anzugeben, auf welche die graue Beobachtungstafel eingestellt werden muss, wenn die Gesichtslinien Seitenwendungen machen sollen. Neigungen des Kopfes werden an dem Hering'schen Kopfhalter abgelesen. Die Parallellinien der Figur 102 dienen zur Controle, dass die graue Tafel immer parallel der Grundlinie (Verbindungslinie der beiden Augendrehpunkte) aufgestellt wird. — Um die Vorrichtung für Convergenzstellungen zu benutzen, müssen die beiden Messingstreifen mit den Haaren einander entsprechend genähert werden; durch Einstellung z. B. des linken Streifens auf den mit + 20° bezeichneten Radius des rechten Radiensystems und Einstellung des rechten Streifens auf den mit + 20° bezeichneten Radius des linken Radiensystems (l'' und r'' Figur 102) hat man, wenn das weisse Rosshaar zwischen den beiden schwarzen erscheinen soll, einen Convergenzwinkel der Gesichtslinien von 40°.

Einen der Hering'schen Vorrichtung sich anschliessenden Apparat, welcher die Stellung der verticalen und horizontalen Trennungslinien bei verschiedenen Augenbewegungen »schnell, sicher und genau« festzustellen ermöglicht, hat Donders (Onderzoekingen in het Physiologisch Laboratorium der Utrechtsche Hoogeschool 1875, Derde Reeks III. 2, p. 45) kürzlich angegeben und Isoscop genannt. Das Isoscop, in Verbindung mit dem Hering'schen, etwas modificirten Kopfhalter, beruht auch auf der Methode der binoculären Bilder und besteht aus einem feststehenden Rahmen, welcher einen verticalen Draht für das eine Auge bietet, und einem verschiebbaren Rahmen, welcher ein oder mehrere, zuerst auch vertical gestellte Drähte dem andern Auge bietet: die Aufgabe ist, den verschiebbaren Rahmen so einzustellen, dass die binocular projicirten Drähte einander parallel erscheinen. Entsprechend sind horizontale Drähte an dem festen und einem stellbaren Rahmen angebracht. Die Einstellung ist in wenigen Sekunden von dem Beobachter zu machen und ist genau bis auf 0,02°.

Figur 103 zeigt die ungefähre Einrichtung des Donders'schen Isoscops: *ABCD* ist der rechtwinklige feststehende Rahmen, mit dem verticalen Drahte *V*, *abcd* der verschiebbare

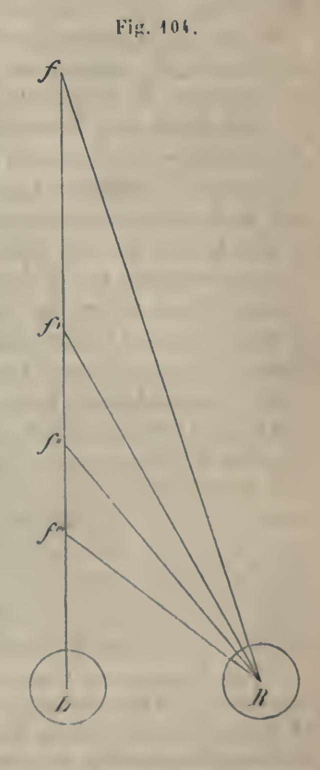
Fig. 103.



Rahmen, welcher sich um die Axen 5 und 6 drehen kann, und an welchem die beiden Drähte v_1 und v_2 befestigt sind; an dem festen Rahmen ist der Gradbogen *s*, an dem verschiebbaren Rahmen der Nonius *n* befestigt. — Die genauere Beschreibung des Apparates, der Methode der Handhabung desselben, namentlich der richtigen Einstellung der Augen würde hier zu weit führen und ist im Original nachzusehen.

§ 71. Association der Bewegungen beider Augen. Bevor wir auf die Resultate, die durch diese verschiedenen Methoden gewonnen worden sind, im Specielleren eingehen, müssen wir zunächst im Ganzen und Grossen die Art, in welcher die Augen bewegt werden, charakterisiren. So weit wir die Augen als Sinneswerkzeuge zur Wahrnehmung der Objecte benutzen, finden wir eine vollständige Abhängigkeit der Augen von einander in ihren Bewegungen oder eine durchgreifende Association derselben, welche sich bis zu den geringsten Einzelheiten bewährt. 1) Bei Erhebungen und Senkungen des Blickes sind die Erhebungswinkel für beide Augen stets die gleichen, mögen wir die Bewegungen von einer Parallelstellung der Blicklinien oder von einer Convergenzstellung derselben aus vornehmen. Es ist dabei gleichgültig, ob wir das eine Auge bedecken, oder beide frei lassen, ob das eine Auge erblindet ist, ob wir alle Willensenergie aufbieten, um nur das eine Auge nach oben zu bewegen, oder unbewusst unsere Augen bewegen, denn auch bei Schlafenden haben die Augen gleiche Erhebung und ebenso bei Chloroformirten und Ohnmächtigen. 2) Dieselbe Association oder Mitbewegung des einen Auges mit dem anderen finden wir auch bei den Seitenwendungen: eine scheinbare Abweichung von dieser Regel beruht nur auf einer intercurrirenden, für sich auch in gleicher Weise associirten Bewegung. Bewegen wir nämlich die Augen nach rechts oder nach links, ohne dass dabei eine Convergenzbewegung stattfindet, also zum Beispiel an Punkten eines Kreises hin, dessen Mittelpunkt in der Mitte zwischen den beiden Drehpunkten der Augen liegt, so ist die Seitenwendung der beiden Augen ganz gleich; denken wir uns anderseits, die Augen bewegten sich an der Medianlinie (der Linie, in welcher die Medianebene und die Blickebene sich schneiden) von der Parallelstellung der Gesichtslinien zu immer grösserer Convergenz entlang, so würde stets der Winkel, welchen die Gesichtslinie des einen Auges mit der Medianlinie bildet, gleich sein dem Winkel, welchen die Gesichtslinie des anderen Auges mit der Medianlinie bildet. Es wird also der Fall eintreten können, dass für das eine Auge die Convergenzbewegung gerade so gross ist als die Seitenwendung, mithin dieses Auge scheinbar unbewegt bleibt, während das andere Auge sich nach der Seite des scheinbar unbewegten Auges hin wendet: wir würden also den Fall haben, dass das eine Auge eine Seitenwendung macht, das andere nicht. Dieser Fall wird eintreten, wenn der Blickpunkt f auf der Gesichtslinie des scheinbar unbewegten Auges über f', f'' bis f''' immer näher rückt, wie Figur 104 anschaulich macht.

Fig. 104.



Allein hier combiniren sich, wie gesagt, zweierlei Bewegungen, nämlich Seitenwendung und Convergenz, wie sich theils aus der mit der Convergenzbewegung veränderten Pupillenweite der Augen (§ 76), theils aus dem von Hering (Binoc. Sehen p. 11 u. 97) geltend

gemachten und durch Versuche nachgewiesenen Umstande ergiebt, dass bei dem scheinbar unbewegten Auge eine kleine Drehung um die Gesichtslinie, eine Rollung eintritt, wie sie der entsprechenden Stellung zukommt. Es sind mithin associirte Bewegungen beider Augen vorhanden sowohl für die Seitenwendung, wie für die Convergenzbewegung. Ein Entgegenwirken der beiden Bewegungsarten mit dem angegebenen Erfolge wird nur dadurch möglich, dass die Seitenwendungen gleichseitig und unsymmetrisch, die Convergenzbewegungen aber ungleichseitig und symmetrisch erfolgen: für das scheinbar unbewegte Auge also die gleichseitige Bewegung gerade so gross ist, als die erforderliche ungleichseitige Bewegung.

Was von den einfachen Erhebungen und Seitenwendungen gilt, das gilt auch von denjenigen Bewegungen, in welchen Erhebung und Seitenwendung combinirt sind: wird also z. B. bei Parallelstellung der Gesichtslinien (wir setzen diese, um unnöthige Complicationen zu vermeiden) das rechte Auge nach oben und rechts gewendet, so bewegt sich das linke Auge mit gleicher Excursion nach oben und rechts u. s. w.

Wie wir schon in § 60 die Abhängigkeit der beiden Augen von einander in Beziehung auf die Richtung des Projicirens erwähnt und die beiden Augen nach Hering als Doppelauge angesehen haben, so müssen wir auch in Bezug auf die Bewegungen mit Hering (Binoc. Sehen 1868, p. 3) ein Doppelauge statuiren, welches Hering treffend mit einem Doppelgespann vergleicht, welches mit einfachen Zügeln geleitet und von dem Willen wie ein Organ gehandhabt wird. Wir werden die Bedeutung dieser harmonirenden Bewegungen der beiden Augen für das Sehen in § 76 zu erläutern haben, ich will aber schon hier darauf hinweisen, dass die Harmonie unserer Augenbewegungen in einem für unsere Orientirung sehr wichtigen Zusammenhange mit den Bewegungen des Kopfes steht: wir können Erhebungen und Seitenbewegungen der Blicklinien bei unbewegten Augen fast in gleicher Weise durch die Bewegungen des Kopfes herbeiführen, wie bei unbewegtem Kopfe durch Bewegungen der Augen, und wir verfahren beim gewöhnlichen Sehen so, dass wir Kopf- und Augenbewegungen zugleich ausführen, also z. B. um nach oben zu sehen, sowohl den Kopf nach rückwärts beugen, als auch unser Doppelauge nach oben richten: beim Sehen nach rechts nicht blos die Augen, sondern zugleich den Kopf nach rechts wenden, und es bedarf sogar besonderer Dressur, z. B. bei den Soldaten oder beim Experimentator, um die Kopfbewegungen auszuschliessen. Offenbar würde eine Unterstützung der Augenbewegungen durch Kopfbewegungen nicht in dem Maasse stattfinden können, wenn die beiden Augen sich nicht als Doppelauge, sondern jedes für sich, wie beim Chamaeleon, bewegten, und es würde bei Combination von Augen- und Kopfbewegungen die richtige Orientirung gestört werden. Wir werden in § 76 sehen, dass die Unterstützung der Augenbewegungen durch Kopfbewegungen in der Einrichtung des Innervationscentrums begründet ist.

Die Frage, ob die Association der Augenbewegungen erworben oder angeboren ist, kann ich mit Johannes Müller (Handbuch der Physiologie 1840, II. p. 103) und Hering (Binoc. Sehen p. 6) nur dahin beantworten, dass ich sie für angeboren ansehen muss. Die Augenbewegungen sind nicht erlernt, wie etwa die Bewegungen des Gehens, oder sonstige uns geläufige Bewegungen, sondern sind schon bei den jüngsten Kindern eben so associirt, wie beim Erwachsenen. Es ist gewiss denkbar, dass wenn durch eine Reihe von Generationen hindurch

ein Bewegungsmodus, wie wir ihn beim Chamaeleon finden, eingeübt wurde, dann die Menschen mit diesem anderen Bewegungsmodus ausgestattet geboren werden würden — finde indess, dass derartige Speculationen nicht mehr in die Physiologie gehören.

Wir werden in § 75 einige Ausnahmen von gleichmässiger Association zu erwähnen haben, welche indess zugleich die grosse Festigkeit der Association darzuthun geeignet sind.

§ 72. Bewegungen aus der Primärstellung. Das Listing'sche und Donders'sche Gesetz. — Von besonderem Interesse für die Physiologie der Augenbewegungen ist die Frage, ob mit den Erhebungen, Seitenwendungen und Convergenzen der Blicklinien Drehungen des Auges um die Blicklinie stattfinden? Diese Frage steht nämlich in engster Verbindung mit unserer Wahrnehmung der Dimensionen des Raumes oder mit unserer Orientirung im Raume. Denken wir uns irgend eine Blicklage, oder Augenstellung, bei welcher sich eine Linie z. B. vertical auf unseren Netzhäuten abbildet und denken wir uns dann eine zweite Blicklage, bei welcher wieder ein verticales Bild auf der Netzhaut entworfen wird, so würde, wenn sich die Netzhaut beim Uebergange aus der ersten in die zweite Lage um die Gesichtslinie gedreht hätte, das Netzhautbild der ersten Lage einen Winkel bilden mit dem Netzhautbilde der zweiten Lage und es würde uns die eine Linie vertical, die andere geneigt zur Verticalen erscheinen, und wir würden in Zweifel sein, ob die gesehene Linie vertical ist oder nicht. Für viele Blicklagen tritt dieser Fall in der That ein, und zwar in sehr verschiedenem Grade — es giebt aber eine Blicklage, aus welcher heraus jede gerade Blickbewegung ohne eine Drehung des Auges um die Gesichtslinie erfolgt, diese Blicklage heisst die Primärstellung. Dieser Satz wird das Listing'sche Gesetz genannt, da es von Listing (Ruete, Lehrbuch der Ophthalmologie 1854, I. p. 37) zuerst (freilich in anderer Form) ausgesprochen worden ist. Listing hat es in folgender Form hingestellt: »Aus der Primärstellung wird das Auge in irgend eine andere, secundäre, durch die Cooperation der sechs Muskeln in der Weise versetzt, dass man sich diese Versetzung als das Resultat einer Drehung um eine bestimmte Drehungsaxe vorstellen kann, welche, jederzeit durch das Augencentrum gehend, auf der primären und der secundären Richtung der optischen Axe senkrecht steht, so dass also jede secundäre Stellung des Auges zur primären in der Relation steht, vermöge welcher die auf die optische Axe projicirte Drehung = 0 wird.«

Ich führe noch die Form an, in welcher Helmholtz (Physiol. Optik p. 466) und Hering (Binoculares Sehen p. 64) das Listing'sche Gesetz aussprechen; Helmholtz: »Wenn (bei parallel gerichteten normalsichtigen Augen) die Blicklinie aus ihrer Primärstellung übergeführt wird in irgend eine andere Stellung, so ist die Raddrehung des Augapfels in dieser zweiten Stellung eine solche, als wäre er um eine feste Axe gedreht worden, die zur ersten und zweiten Richtung der Blicklinie senkrecht steht.« — Hering: »Es giebt eine gewisse Stellung der Gesichtslinie (relativ zum Kopfe), die sogenannte Primärstellung, aus welcher heraus die Gesichtslinie nach jeder beliebigen Richtung hin eine ebene Bahn beschreiben, oder der Blick einer geraden Linie entlang laufen kann, ohne dass dabei das Auge irgend welche Rollung um die Gesichtslinie erfährt, eine Stellung also, aus welcher das Auge nach allen Richtungen hin um eine feste, zur Gesichtslinie senkrechte Axe gedreht werden kann.«

Zur Charakterisirung der Primärstellung diene noch Folgendes: 1) bei der Primärstellung sind die Gesichtslinien parallel; 2) denkt man sich durch die Gesichtslinie in der Primärstellung alle möglichen Ebenen (die primären Meridianebenen) gelegt, so stellen diese Ebenen die Gesammtheit derjenigen Bahnen dar, welche die Gesichtslinie beschreiben kann ohne Rollung des Auges; 3) die Durchmesser, welche bei Primärstellung senkrecht zur Gesichtslinie durch den Drehpunkt des Auges gehen, sind die Axen für die Bewegungen aus der Primärstellung — sie bilden eine zur Gesichtslinie senkrechte Ebene (primäre Axenebene). (Hering, Binoc. Sehen p. 65); 4) alle Blickbewegungen, welche nicht von der Primärstellung ausgehen und auch nicht durch die Primärstellung hindurchgehen, sind mit einer Rollung um die Gesichtslinie verbunden.

Der letzte Satz ist nur der negative Ausdruck des Listing'schen Gesetzes, kommt aber zur Geltung, wenn es sich um die Auffindung der Primärstellung, welche für jedes Individuum durch Versuche zu ermitteln ist, handelt. Listing hat sein Gesetz nicht durch Versuche bewiesen, dies ist erst von Helmholtz (Arch. f. Ophthalm. 1863, IX. 2, p. 175) ausgeführt worden und zwar mittelst der Nachbildermethode (§ 70, 2): richtet man die parallelen Gesichtslinien auf einen irgendwie gerichteten farbigen Streifen an einer entfernten Wand einige Sekunden, um ein Nachbild von dem Streifen zu bekommen, und bewegt dann die parallelen Gesichtslinien an der Wand hin genau in der Richtung des Streifens, so behält das Nachbild nur dann die Richtung, in der die Bewegung stattfindet, wenn die Augen in der Primärstellung sind — andernfalls bildet das Nachbild einen Winkel mit der Richtung, in welcher sich der Blick bewegt.

Helmholtz giebt zur Auffindung der Primärstellung folgende Anleitung: Beobachtet man, einer verticalen, mit horizontalen und verticalen Linien versehenen Wand gegenüber stehend, einen lebhaft gefärbten verticalen und desgleichen horizontalen Streifen an derselben, die sich in der Höhe der Augen kreuzen, und fixirt bei gegebener Stellung das Visirzeichen den Kreuzungspunkt der beiden Streifen einige Zeit und lässt nun den Blick von der fixirten Stelle aus gerade nach oben und gerade nach unten, dann horizontal nach rechts und nach links wandern, so muss das Nachbild horizontal bezw. vertical bleiben; bleibt es nicht horizontal, so muss man dem Visirzeichen (§ 70) eine andere Lage geben, bis man die richtige Lage desselben gefunden hat. Und zwar muss man das Stäbchen des Visirzeichens weiter nach links rücken, wenn man, nach oben blickend, das linke Ende des Nachbildes höher, nach unten blickend dasselbe tiefer stehend findet. Findet man, nach obend blickend, das rechte Ende des Nachbildes höher, so verschiebt man das Stäbchen nach rechts. Man verschiebe dagegen das Stäbchen nach oben, wenn man, nach links blickend, das linke, nach rechts blickend das rechte Ende des Nachbildes tiefer stehend findet. Man verschiebe es nach unten, wenn man umgekehrt nach links blickend das rechte Ende des Nachbildes tiefer findet, nach rechts blickend dagegen das linke. Hat man endlich die Primärstellung gefunden, so kann man zur weiteren Prüfung des Listing'schen Gesetzes übergehen.

Helmholtz ermittelte für seine Augen, dass die Primärstellung etwa in der Mitte seines Blickfeldes läge, d. h. in der Mitte des Umkreises, welchen die Gesichtslinie durchlaufen kann, dass sie aber nicht constant sei, sondern an dem

einen Tage ein wenig höher, an dem anderen ein wenig tiefer läge und sich sogar während einer Versuchsreihe änderte. Wir verweisen auf die in § 61 gemachten Angaben von Donders, welche den Helmholtz'schen Erfahrungen bestätigend secundiren. Hering (Binoc. Sehen p. 44) hat eine viel höhere Lage der Blickebene für seine Primärstellung gefunden, wobei allerdings in Betracht kommt, dass Hering etwas kurzsichtig ist.

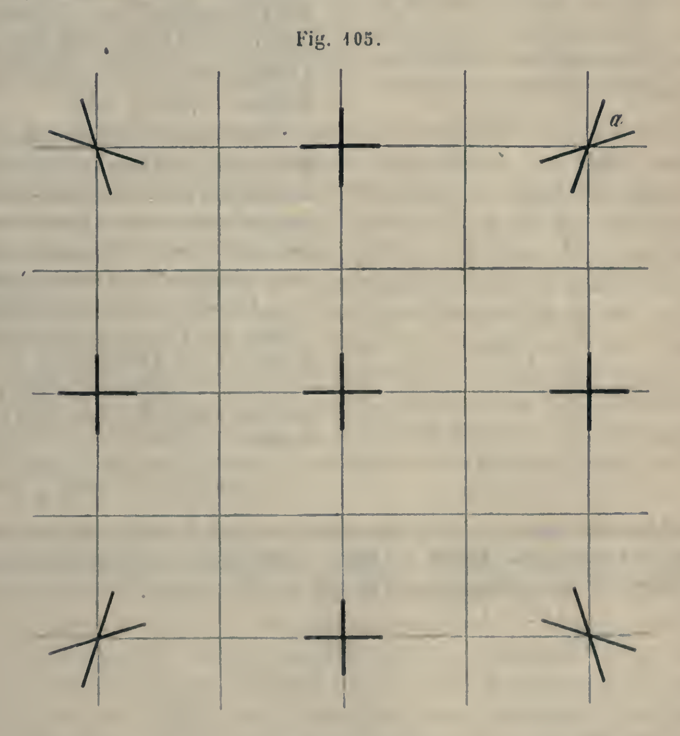
Helmholtz fand also, dass die Nachbilder seiner verticalen und horizontalen Linien keine Abweichung von diesen Richtungen zeigten, wenn der Blick in verticaler und in horizontaler Richtung wanderte. Wurde aber die Blicklinie in der diagonalen Richtung zwischen vertical und horizontal bewegt, so erschienen die Nachbilder geneigt und zwar:

1) bei Richtung des Blicks nach rechts oben oder links unten
das Nachbild der Horizontallinie gegen die Linien der Wand links gedreht — das Nachbild der Verticallinie rechts gedreht,

2) bei Richtung des Blicks nach links oben oder rechts unten
das Nachbild der Horizontallinie nach rechts, das der Verticallinie nach links gedreht.

Die Stellungen des Nachbildes gegen die Linien der Wand sind in Figur 105 (nach Hering) dargestellt. Diese Verschiebung der Linien des Nachbildes ist die

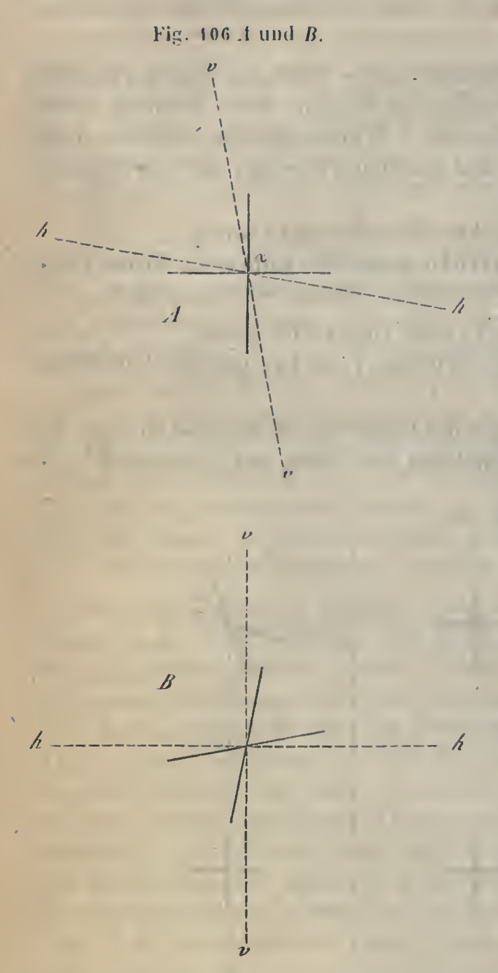
Fig. 105.



Folge einer unrichtigen Projection desselben: die verticalen und horizontalen Linien der Wandebene bilden sich auf der Netzhaut bei dem Blick nach rechts

oben schiefwinklig durchkreuzt ab, sowie das die punktirten Linien $\nu\nu$, hh in Figur 106 (Hering) zeigen, während das Nachbild rechtwinklig bleibt. Da wir aber die wirklichen Linien auf der Wand doch rechtwinklig sehen, so legen wir, uns nach den wirklichen Linien richtend, das Nachbild so aus, als ob es verdreht wäre, und es muss uns dann so wie in Figur 106 *B* gedreht erscheinen. Die der Drehung der verticalen Linie entgegengesetzte Drehung der horizontalen Linie zeigt schon, dass es sich bei diesen Verschiebungen des Nachbildes nicht um eine Rollung um die Gesichtslinie handeln kann. (Hering, Binocul. Sehen 1868, p. 68. Donders, Archiv für Ophthalm. 1870, XVI. 2, p. 167. Schön, Archiv für Ophthalm. 1874, XX. 2, p. 171 und 1875, XXI. 2, p. 205.) Es ergiebt sich auch, dass, da die Drehung des horizontalen Nachbildes der des verticalen entgegengesetzt ist, bei dieser Blickbewegung ein diagonales Nachbild ungedreht bleiben muss, wie das Listing'sche Gesetz fordert. (Helmholtz, Physiol. Optik p. 518.)

Fig. 106 *A* und *B*.



Helmholtz hat den ganzen Gang der Erscheinung in Figur 154 seiner Physiologischen Optik p. 465 dargestellt und p. 467 die Resultate der dieser Figur zu Grunde gelegten, p. 497 und p. 854 entwickelten Berechnung tabellarisch zusammengestellt.

Helmholtz findet für den Raddrehungswinkel unter Voraussetzung der strengen Gültigkeit des Listing'schen Gesetzes nach der (Arch. f. Ophthalm. 1863, IX. 2, p. 206 und Physiologische Optik p. 496 entwickelten Formel

$$-\operatorname{tang}\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \operatorname{tang}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \operatorname{tang}\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

wo γ den Raddrehungswinkel, α den Erhebungswinkel und β den Seitenwendungswinkel bedeutet. In der beistehenden Tabelle XXVIII. von Helmholtz (Physiologische Optik p. 467) sind die Werthe der Raddrehungswinkel für die beiden anderen Winkel von 5 zu 5 Graden angegeben.

Tabelle XXVIII. (Helmholtz.)

‹eiten-dungs-inkel.	Erhebungswinkel.							
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
5°	0° 13′	0° 26′	0° 40′	0° 53′	1° 7′	1° 21′	1° 35′	1° 49′
10°	0° 26′	0° 53′	1° 19′	1° 46′	2° 13′	2° 41′	3° 10′	3° 39′
15°	0° 40′	1° 19′	1° 59′	2° 40′	3° 21′	4° 2′	4° 45′	5° 29′
20°	0° 53′	1° 46′	2° 40′	3° 34′	4° 29′	5° 25′	6° 22′	7° 21′
25°	1° 7′	2° 13′	3° 21′	4° 29′	5° 38′	6° 48′	8° 0′	9° 14′
30°	1° 21′	2° 41′	4° 2′	5° 25′	6° 48′	8° 13′	9° 39′	11° 8′
35°	1° 35′	3° 10′	4° 45′	6° 22′	8° 0′	9° 39′	11° 21′	13° 6′
40°	1° 49′	3° 39′	5° 29′	7° 21′	9° 14′	11° 8′	13° 6′	15° 5′

Donders (l. c. p. 165) hat ein Instrument, das Phänophthalmotrop, construirt, um iese Drehungen für jede Augenstellung zu veranschaulichen und nach Graden zu bestimmen. uch Schön (l. c. p. 174) hat die Ableitung der Nachbilddrehungen gegeben.

Das Donders'sche Phänophthalmotrop besteht im Wesentlichen aus einer um 3 Axen rehbaren Kugel, welche von einem Axenkanal durchbohrt ist und an welcher der verticale nd horizontale Meridian durch feste Stäbchen repräsentirt sind; die Drehungswinkel können uf Gradtheilungen abgelesen und durch den Axenkanal kann auf eine mit verticalen und horiontalen Linien versehene Ebene visirt werden, um die Abweichungen des in dem Axenkanal ngebrachten Fadenkreuzes von den Linien der Ebene bei der verschiedenen Stellung der ugel, welche das Auge repräsentirt, zu beobachten. Einen Apparat, welcher denselben Zweck at, hat Hermann (Pflüger's Archiv 1873, VIII. p. 305) angegeben und Blemmatotrop genannt.

Will man den für diese Verschiebungen des Nachbildes von Helmholtz eingeführten Ausdruck »Raddrehungen« weiterhin gebrauchen, so muss man dabei esthalten, dass es sich dabei nicht um Drehungen des Auges um die Gesichtslinie, sondern nur um Projectionsvorgänge handelt — es würde sich empfehlen, ieselben nach Schön's (Arch f. Ophthalm. 1874, XX. 2, p. 312) und Graefe's lieses Handb. Bd. VI. p. 8) Vorgang als »Helmholtz'sche Raddrehungen« on den Rollungen, d. h. den Rotationen um die Gesichtslinie zu unterscheiden. — Es mag noch hervorgehoben werden, dass verticale und horizontale leridiane, wie schon aus dem Obigen hervorgeht, keinerlei Beziehung u dem Listing'schen Gesetze haben, da dasselbe für alle Meridiane ilt, und dieselben nur die Bedeutung von conventionellen, zur Verständigung ienenden Anfangsmeridianen haben, ähnlich wie der Meridian von Ferro in der eographie.

Während also bei Bewegungen der Gesichtslinie in einer Ebene, welche urch die Primärstellung gelegt ist, keine Rollung des Auges um die Gesichtslinie intritt, so tritt eine Rollung des Auges um die Gesichtslinie ein, wenn die Geichtslinie irgend welche andere ebene Bahnen beschreibt. Lassen wir also den lick eine Linie beschreiben, welche parallel mit einer primären Bahn, aber um ine Anzahl Grade von derselben entfernt ist, so treten Rollungen des Auges ein, ie im Ganzen aber nur klein sind, wenn die Abweichung von der primären ahn klein ist und der Blick keine sehr grossen Excursionen macht. Numerische estimmungen über die dabei stattfindenden wirklichen Rollungen scheinen nicht ublicirt zu sein. Man kann also wohl sagen, dass bei den Bewegungen, welche

wir mit parallel gerichteten Gesichtslinien zu machen pflegen, die Rollungen des Auges so klein sind, dass dadurch unsere Orientirung im Raume nicht beeinträchtigt wird, oder die gesehenen Lineamente im Raume keine merkliche Veränderung in ihrer Richtung erleiden.

Bevor Listing sein Gesetz ausgesprochen hatte, hatte schon Donders (Holländische Beiträge 1848, I. p. 129) mittelst der Nachbildermethode gefunden, dass bei Seitenwendungen der Augen die verticalen Meridiane eine der Angesichtsfläche parallele Ebene überall in parallelen Ebenen schneiden, und dass für jede bestimmte Richtung der Fixationslinie relativ zur verticalen Kopfstellung, und wie auch immer diese Richtung zu Stande gekommen sein mag, die Stellung des verticalen Meridians unveränderlich dieselbe ist. Dieses Gesetz ist von Helmholtz das Donders'sche Gesetz genannt worden: es ist in Uebereinstimmung mit dem Listing'schen Gesetze, enthält aber noch die weitere, für die Orientirung höchst wichtige Bestimmung, dass, wie Hering (Binoc. Sehen p. 56) es ausdrückt: bei gleicher Blicklage auch die Netzhautlage die gleiche ist. Es ist also die Lage der Netzhaut ganz dieselbe, wenn z. B. der Blick aus der Primärstellung diagonal nach rechts und oben gerichtet worden ist, als wenn er erst nach rechts (durch reine Seitenwendung) und dann nach oben (durch reine Erhebung) geführt worden ist: ein Nachbild hat unter beiden Bedingungen immer dieselbe Lage. Das Donders'sche Gesetz gilt aber ebenso wie das Listing'sche Gesetz zunächt nur für Parallelstellungen der Gesichtslinien und für Augenbewegungen, welche ohne besondere Anstrengung der Muskeln ausgeführt werden. (Hering, Binoc. Sehen p. 58.)

Es hat sich nun allerdings aus den Versuchen mit binocularen Bildern ergeben, dass das Listing'sche Gesetz mit absoluter Schärfe nicht gilt, sondern dass bei den meisten Beobachtern kleine Abweichungen von etwa $^1/_2{}^o$ vorkommen. Wir haben schon in § 61 angegeben, dass bei Vereinigung verticaler Linien durch Parallelstellung der Gesichtslinien die verticalen Trennungslinien der Netzhäute unter einem Winkel von etwa 2° nach oben divergiren. Die Versuche von Volkmann (Helmholtz, Physiol. Optik p. 523) haben nun ergeben, dass sich dieser Divergenzwinkel ein wenig vergrössert bei Richtung des Blickes nach oben, vermindert bei Richtung des Blickes nach unten, und dasselbe hat Hering (Binoc. Sehen p. 88) für seine Augen gefunden; bei Volkmann beträgt die Differenz für beide Augen im Ganzen 0,9°, für Hering etwa $1\,^1/_2{}^o$ bei Uebergang von der tiefstmöglichen zur höchstmöglichen Erhebung, für Helmholtz (Physiol. Optik p. 523) nur 0,3°. Alle diese Beobachter sind aber ein wenig kurzsichtig, und Berthold (Arch. f. Ophthalm. 1865, XI. 3, p. 107), welcher stärkere Myopie ($^1/_{10}$) hat, fand für seine Augen von der stärksten Erhebung des Blickes bis zur tiefsten Senkung eine Veränderung des Winkels für die horizontalen Trennungslinien von etwa 6°.

§ 73. Bewegungen mit Convergenz der Gesichtslinien. — Wenn bei Erhebungen und Seitenwendungen des Blickes aus der Primärstellung keine Rollungen der Augen um die parallelen Gesichtslinien stattfinden, so wird die nächste Frage sein, ob bei Uebergang aus der Primärstellung zu den Secundärstellungen, welche durch Convergenz der Blicklinien hervorgebracht werden,

Rollungen der Augen um die Gesichtslinien eintreten oder nicht? ob also das Listing'sche Gesetz auch für die Convergenzbewegungen Geltung hat? Schon Volkmann (Helmholtz, Physiol. Optik p. 523) hat gefunden, dass bei Convergenz der Gesichtslinien auf einen 300 Mm. entfernten, in der Horizontalebene gelegenen Punkt eine grössere Divergenz der Trennungslinien (scheinbar verticalen Meridiane) eintrat und zwar von 2,15° auf 4,16°; Helmholtz fand eine kleinere Divergenz (0,56°), Dastich (Helmholtz, l. c. p. 469) dagegen gar keinen Einfluss der Convergenz. Hering (Binoc. Sehen p. 96) aber fand bei Convergenz seiner Augen aus der Primärstellung um je 10°, also für einen Convergenzwinkel von 20° eine Divergenzzunahme beider Trennungslinien von 2° auf 2° 42′, bei Convergenzwinkel von 40° auf 6° 50′, bei Convergenzwinkel von 60° auf 9° 34′, und ähnliche Werthe hat Landolt (Tabelle XXX.) für seine Augen ermittelt. Auch die Bestimmungen von Donders (Onderzoekingen in het Utrecht. Physiol. Laborat. 1875, Derde Reeks III. 2, p. 66) bestätigen dies. Es geht daraus hervor, dass bei reinen Convergenzbewegungen das Listing'sche Gesetz seine Gültigkeit verliert und Rollungen des Auges bei Convergenzbewegungen stattfinden. Wir haben ferner schon in § 71 (Figur 102) auf den Versuch von Hering hingewiesen, nach welchem bei Convergenz nur des einen Auges, während die Gesichtslinie des andern Auges ein und dieselbe Lage innehält, gleichfalls eine Rollung des unbewegten Auges eintritt, woraus Hering weiter schliesst, dass die Netzhautlage bei Convergenz der Gesichtslinien nicht von der Stellung der Gesichtslinie des Auges, sondern von der Lage des Blickpunktes abhängig ist. (cf. Hering, Binoc. Sehen p. 57 und p. 97.)

Es ist von vornherein zu erwarten, dass wenn bei einfachen Convergenzbewegungen aus der Primärstellung Rollungen eintreten, dieselben auch auftreten werden, wenn aus den Convergenzstellungen der Augen Erhebungen oder Senkungen des Blickes gemacht werden. Dies ist durch Versuche erwiesen, welche Meissner (Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1854, p. 42), v. Recklinghausen (Archiv für Ophthalm. 1859, V. 2, p. 174) und Hering (Binoc. Sehen 1868, p. 96) angestellt haben. Da bei Meissner und v. Recklinghausen weder die Primärstellung ermittelt wurde, noch auf die veränderte Flächenprojection oder Helmholtz'sche Raddrehung Rücksicht genommen ist, so führe ich nur die Resultate, welche Hering erhalten hat, an, bei welchen Primärstellung und Raddrehungswinkel bestimmt worden sind, und zwar, da es hier nur auf eine Uebersicht ankommt, nur die Resultate, welche Hering bei einem Convergenzwinkel von 20°, also einer Innenwendung jeder Gesichtslinie um 10° erhalten hat. Neben den Erhebungen und Senkungen der Blickebene sind im ersten Stabe die auf Grund des Listing'schen Gesetzes nach der Helmholtz'schen Formel berechneten Raddrehungen (cf. § 72 Tabelle XXIX.), in dem zweiten Stabe die durch die Beobachtung gefundenen und auf eine zur Gesichtslinie senkrechte Ebene reducirten Divergenzen der verticalen Trennungslinie von der verticalen Lage, in dem dritten Stabe die Differenzen der gefundenen von der berechneten Drehung angegeben; der dritte Stab enthält also die Werthe der Rollung oder der Abweichung von dem Listing'schen Gesetze. Die Erhebungswinkel sind mit +, die Senkungswinkel mit —, die Divergenzwinkel mit + bei Divergenz der verticalen Trennungslinie mit dem oberen Ende nach aussen, ebenso die Differenzen bei

gleichsinniger Abweichung der verticalen Trennungslinien von der berechneten Divergenz mit + bezeichnet.

Die im dritten Stabe verzeichneten Werthe sind nicht direct gefunden, sondern umgerechnet auf eine zur Gesichtslinie senkrechte Ebene, nach der Formel $\tang x = \tang \alpha \cos \varphi$, wo α den direct abgelesenen, φ den Ablenkungswinkel der Gesichtslinien, x den reducirten Winkel bedeutet. (cf. Berthold, Arch. f. Ophthalm. 1865, XI. 3, p. 129.)

Tabelle XXIX. (Hering.)

Neigung der Blickebene.	Convergenzwinkel 20°.		
	Berechnete Divergenz.	Gefundene Divergenz.	Differenz = Rollung.
+ 15°	+ 2° 19′	+ 2° 1′	— 0° 18′
+ 10°	+ 1° 53′	+ 1° 46′	— 7′
+ 5°	+ 1° 26′	+ 1° 30′	+ 4′
0°	+ 1°	+ 1° 21′	+ 21′
— 5°	+ 0° 34′	+ 1° 14′	+ 40′
— 10°	+ 7′	+ 1° 7′	+ 1° —
— 15°	— 19′	+ 0° 59′	+ 1° 18′
— 20°	— 46′	+ 52′	+ 1° 38′
— 25°	— 1° 13′	+ 42′	+ 1° 55′
— 30°	— 1° 41′	+ 28′	+ 2° 9′
— 35°	— 2° 10′	+ 10′	+ 2° 20′
— 40°	— 2° 39′	0°	+ 2° 39′
— 45°	— 3° 8′	— 23′	+ 2° 45′
— 50°	— 3° 40′	— 43′	+ 2° 57′

Die bedeutenden Differenzen im letzten Stabe zwischen den berechneten und den gefundenen Divergenzen zeigen also, dass in der Convergenzstellung der Augen bei Erhebung und Senkung der Blickebene Rollungen der Augen um die Gesichtslinien eintreten, das Listing'sche Gesetz also nicht mehr gilt.

Es wird aus den Hering'schen Zahlen ausserdem ersichtlich, wodurch Meissner bei seinen Untersuchungen zu der Annahme gelangte, dass die Primärstellung bei Neigung der Blickebene um 45° in Convergenzstellung der Augen gegeben sei, indem er bei dieser Blicklage ebenso wie Hering bei 40° Senkung der Blickebene Parallelismus der Trennungslinien beobachtete. (cf. Donders, Onderzoekingen etc. Derde Reeks II. 1873, p. 381.)

Hering hat nun weiter bei Convergenzwinkeln von 40° und 60° noch viel grössere Abweichungen gefunden, indess sind Convergenzen von 60° schon so gewaltsam, dass sie bei emmetropischen Augen kaum ausgeführt werden. Ich hoffe, dem Wunsche Hering's, dass Jemand, dessen Augen sich in motorischer Beziehung ganz symmetrisch verhalten, diese Versuche ausführen möge, mit meinen nur wenig presbyopischen Augen baldigst nachkommen zu können.

Herr Dr. Landolt hat mir folgende Versuche über die Richtung der scheinbar verticalen Meridiane (Trennungslinien) bei verschiedenen Graden von Convergenz, bei Hebung und bei Senkung der Blickebene zur Mittheilung übergeben.

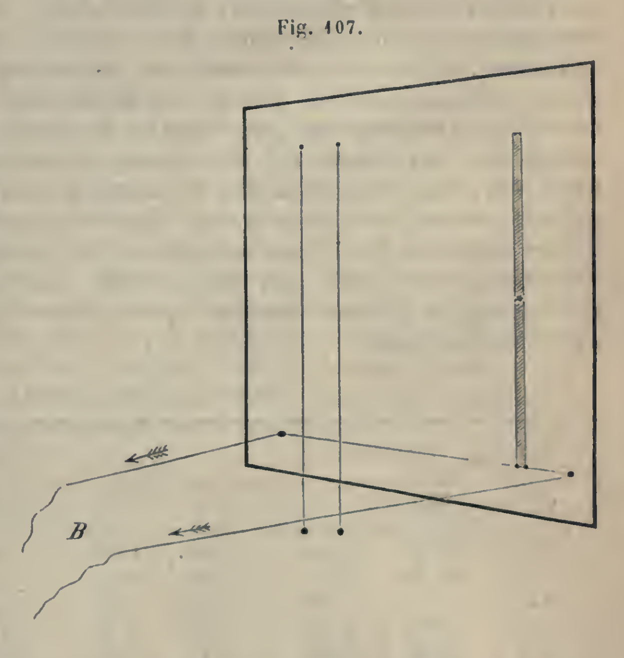
»Die Versuche wurden mit Hilfe des von Hering (Binoc. Sehen p. 78) angegebenen Apparates vorgenommen. Dieser Apparat ermöglicht, dass die durch

eide Gesichtslinien gelegte Ebene immer senkrecht steht zu der Ebene, auf velche dieselben gerichtet sind. Dies wird dadurch erreicht, dass Hebung und enkung der Blicklinien durch Drehung des Kopfes um die durch beide Drehunkte der Augen gelegte Axe vollzogen wird, während der Blick seine Richtung eibehält.

Die Einstellung der Drehpunkte in die Drehungsaxe des Apparates wurde in er Weise vorgenommen, wie Hering angiebt.

Auf einer 1 Meter von der Verbindungslinie der Drehpunkte entfernten vercalen grauen Tafel (Figur 107) ist in gleicher Höhe mit der Drehungsaxe eine Iorizontale gezogen, und arauf sind die Punkte beierkt, welche jedes Auge xiren muss, wenn die ugen parallel stehen, oder venn sie um bestimmte rade convergiren sollen. Die Convergenz über 8° vurde dabei natürlich urch Kreuzung der Sehnien erreicht.

Fig. 107.



Dem linken Auge entprechend werden zwei chwarze Fäden an der Vand aufgehängt, dem echten Auge entsprechend in schmaler rother Blechtreif. Letzterer, in der litte durchbohrt, wurde nit einer Nadel an die Vand geheftet und konnte im diesen Punkt mit Hilfe ler Fäden gedreht werden, welche, von seinem unteren Ende aus, in beiden Richtungen erst um ein Hypomochlion der Tafel, dann in die Hände des Bebachters *B* liefen.

Fixirt das linke Auge die Mitte zwischen beiden Fäden, das rechte gleicheitig den rothen Streifen, dann scheint dieser zwischen den beiden Fäden zu iegen, und zwar ist er ihnen parallel, wenn die verticalen Meridiane parallel tehen, oder aber es scheinen die Fäden gegen den Streif um so viele Grade geieigt, wie die Meridiane gegen einander geneigt sind, aber in umgekehrtem inne. Die Grade, um welche der Streifen gedreht werden muss, bis er den chwarzen Linien parallel scheint, geben dann also die Neigung der Meridiane egen einander an.

Die Versuche — vielfach wiederholt — ergaben, dass bei mir in der Primärtellung schon eine geringe Neigung der Meridiane von circa $^1/_2$° stattfindet und war in der Art, dass ihre oberen Enden nach aussen, ihre unteren nach innen eneigt sind. Diese Neigung soll mit + bezeichnet werden.

Diese Neigung nimmt zu bei Convergenz in der Horizontalen sowohl als beim

Blick nach oben und parallelen Gesichtslinien, besonders aber bei Combination von Hebung und Convergenz der Blicklinien. Bei Hebung des Blickes um 25° und Convergenz von 30° ist die Neigung der verticalen Meridiane bei mir + 16°30′ Jedes einzelne Auge wird sich also wahrscheinlich um 8° 15′ drehen.

Beim Blick nach unten und Parallelstellung der Gesichtslinien nimmt die Neigung der verticalen Meridiane ab, wird bei 25° Senkung = 0 und geht bei 40° in die entgegengesetzte Richtung über, so dass die oberen Enden sich der Medianebene nähern, die unteren davon entfernen.

Bei geringer Senkung und Convergenz der Blicklinien tritt bei mir allerdings die positive Neigung wieder auf, ist aber gering: bei 10° Convergenz und 40° Senkung erreicht sie nicht einmal 2° (s. Tabelle XXX.). Senke ich den Blick noch mehr, als um 40°, dann tritt ganz entschieden negative Neigung der verticalen Meridiane auf. Die Tabelle enthält allerdings nur Versuche mit Hebung um 25° und Senkung um 40°. Stärkere Hebungen und Senkungen wiederholt auszuführen und längere Zeit auszuhalten, war mir mit dem Apparate sehr beschwerlich, und habe ich darum die wenigen derartigen Versuche nicht aufgezeichnet, weil sie nicht genau waren. Das aber liess sich sicher constatiren, dass mit der Hebung und der Congruenz die positive Neigung der Meridiane zunahm, während sie beim Blick nach unten abnahm und schliesslich negativ wurde. Die Neigung der Meridiane liess sich bei den höheren Graden sicherer bestimmen, als bei den niedrigen.

Tabelle XXX. (Landolt.)

Convergenz.	Erhebung.				Senkung.				
	25°	20°	10°	0°	10°	20°	25°	30°	40°
6°	1° 30′	0° 50′	0° 40′	0° 30′	0° 10′	0° 5′	0°	— 0° 10′	— 1°
5°	2°	1° 5′	1°	1° 30′	1°	weniger als		1°	1°
6°	2° 30′	2°	1° 5′	1° 45′	1° 20′	1°	—	1° 10′	1° 3
7°	3°	2° 30′	2° 30′	2° 5′	1° 30′	1° 30′	1°	1° 30′	1° 3
8°	3°	2° 20′	2° 20′	2° 5′	1° 30′	1° 30′	1°	1° 30′	1° 3
9°	3° 10′	2° 20′	2° 30′	2° 10′	1° 40′	1° 30′	1° 15′	1° 30′	1° 3
10°	4° 20′	3° 30′	3°	2° 30′	2°	1° 40′	1° 30′	1° 50′	1° 4
11°	5°	3° 30′	3°	2° 40′	2°	1° 50′	—	2°	1° 5
12°	5°	3° 40′	3° 10′	2° 55′	2° 10′	2°		2°	1° 3
13°	7°	3° 40′	3° 40′	3° 20′	2° 30′	2°		2° 10′	1° 3
14°	7° 30′	4°	3° 40′	3° 30′	2° 40′	2° 5′		2° 20′	1° 3
16°	8°	5° 30′	4° 5′	3° 55′	3°	2° 10′		2° 30′	2°
18°	9°	5° 30′	5°	4° 50′	4°	3°		2° 50′	2° 3
20°	11°	7° 30′	6°	5° 40′	4° 30′	3° 30′		3° 10′	2° 4
25°	15°	8°	7°	5° 52′	4° 50′	4°		3° 30′	2°
30°	16° 30′	10°	8°	6° 50′	5° 50′	4°		4°	1°

Die Werthe sind die direct abgelesenen Zahlen, also nicht ohne weiteres mit Hering's obigen Werthen vergleichbar.

In der That bleiben die Augen in allen Stellungen nie absolut ruhig stehen. Es kommen Schwankungen von 30′ leicht vor und die niedrigen Zahlen bei geringer Convergenz und geringer Erhebung oder Senkung der Blicklinien sind

irklich nur die Mittelzahlen aus sehr vielen Versuchen. Bei den höheren Graden ind die Befunde genauer.«

§ 74. Umfang und Form des Blickfeldes. — Wir haben schon bei nderen Gelegenheiten (§ 56 und § 69) Bestimmungen über den Umfang der ugenbewegungen angeführt und damit die Grösse des möglichen monocularen lickfeldes bestimmt. Es ist ausserdem zu ermitteln die Grösse des binocularen lickfeldes bei Parallelstellung der Gesichtslinien und bei Convergenzstellungen erselben, ferner die Grösse des Blickfeldes bei unbewegtem Kopfe und die Grösse er Zunahme des Blickfeldes durch Kopfbewegungen. Von weiterem Interesse st dann die Frage, welche Bewegungsgrenzen beim gewöhnlichen, ungezwungenen ehen für Augen und Kopf innegehalten zu werden pflegen, oder wie gross nach ering's Bezeichnung das »engere Blickfeld« ist.

Diese Bestimmungen sind bis jetzt nur zum Theil ausgeführt: die Grösse er monocularen möglichen Augenbewegungen ist von Volkmann (cf. § 69), von elmholtz und mir (§ 66), ferner von Donders und Schuurmann (cf. III. 1 dieses andbuchs p. 233), von Hering (Binoc. Sehen p. 44) bestimmt worden, und beägt für Seitenwendungen im Ganzen etwa 80° bis 90°, für Erhebungen und enkungen ungefähr eben so viel. Die Bestimmungen sind theils mit dem Perieter, oder perimeterartigen Vorrichtungen, theils mit besonderen Vorrichtungen ngestellt worden, von denen die Donders-Schuurmann'sche Bd. III. 1, p. 233 eschrieben ist, die Hering'sche aber sogleich beschrieben werden soll.

Wir stellen die bisherigen Bestimmungen, welche aber nicht immer von der rimärstellung aus gemacht worden sind, hier zusammen:

Tabelle XXXI.

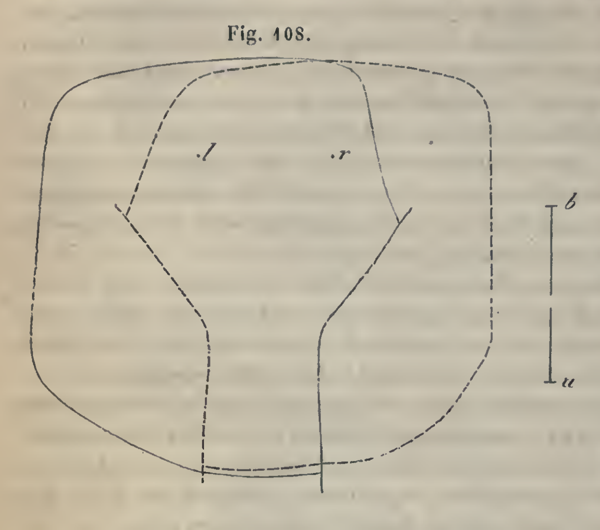
	Nach oben.	Nach unten.	Nach innen.	Nach aussen.
Volkmann	35°	50°	42°	38°
Aubert (rechtes Auge)	30°	57°	44°	38°
Helmholtz	(45)	(45)	(50)	(50)
Schuurmann	34°	57°	45°	42°
Graefe	—	—	44°	38°
Hering, linkes Auge	20°	62°	44°	43°
Hering, rechtes Auge	20°	59°	46°	43°

Durchgehends ist die Excursion nach oben geringer als die nach unten und lie Excursionsweite nach aussen geringer als die nach innen.

Die von Hering (Binoc. Sehen p. 43) angewendete Methode zur Bestimmung ler Blickfeldgrenzen hat den Vorzug, dass man der Täuschung nicht ausgesetzt st, einen Punkt, auf welchen man die Gesichtslinien nicht eingestellt hat, doch ür den fixirten Punkt zu halten, eine Täuschung, welche bei angestrengten Wenlungen sehr leicht eintritt. Hering benutzt ein in der Primärstellung erzeugtes Nachbild, welches er auf einer entfernten grauen Wand wandern lässt bis an die usserste Blickgrenze. Parallel zu den Verbindungslinien der Knotenpunkte wird ine verticale Glastafel aufgestellt und auf dieser zuerst die beiden Punkte, in velchen die Glastafel von den Gesichtslinien in der Primärstellung geschnitten

wird, markirt, dann lässt man das von einer kleinen Scheibe gewonnene Nachbild auf der Wand wandern so weit wie möglich und markirt den von der Gesichtslinie auf der Glastafel durchschnittenen Punkt; indem man dieses Verfahren für verschiedene Richtungen des Blickes wiederholt, bekommt man auf der Glastafel eine Reihe von Punkten verzeichnet, welche die Grenzpunkte oder in ihrer Verbindung die Grenzcurve des Blickfeldes darstellen.

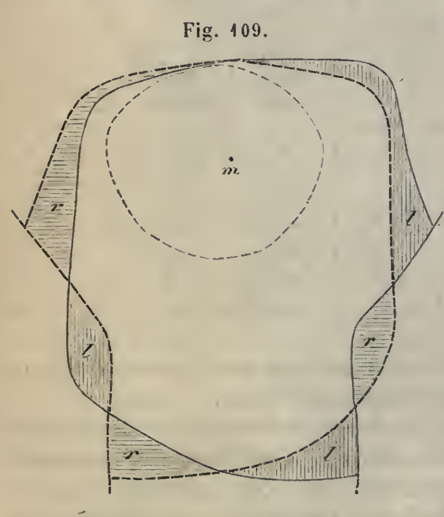
Fig. 108.



Nach dieser Methode hat Hering für seine Augen die in Figur 108 dargestellten Grenzen für das Blickfeld seines rechten (die punktirte Linie) und linken (die ausgezogene Linie) Auges bestimmt; die Linie *ab* giebt das Maass für den Abstand der Glastafel von den Knotenpunkten der Augen für die gezeichnete Grösse des Blickfeldes an.

Denkt man sich für eine sehr entfernte Ebene die Punkte *l* und *r* in einen Punkt, in Figur 109 den Punkt *m*, vereinigt, so erhält man eine ähnliche Form des binocularen Blickfeldes, wie sie Helmholtz (Physiol. Optik p. 484 Figur 161) gegeben hat. Diejenigen Theile der Figur, auf welche sich nur das linke Auge einstellen kann, sind in der Figur vertical schraffirt und mit *l* bezeichnet, die nur dem rechten Auge zugänglichen horizontal schraffirt und mit *r* bezeichnet.

Fig. 109.



Wie Hering weiter ermittelt hat, ist nun aber der Theil des Blickfeldes, mit welchem sich in Figur 109 die beiden monocularen Blickfelder decken, nicht zugleich wirklich das binoculare Blickfeld, vielmehr ist das wirklich binoculare Blickfeld viel beschränkter: es ist durch die punktirte Linie in Fig. 109 bestimmt. Hering erklärt diese bedeutende Einschränkung des binocularen Blickfeldes im Vergleich zu dem Gebiete der beiden monocularen Blickfelder für das fernsehende Doppelauge aus einer geringeren Wirkungsfähigkeit der Abductorengruppe (Lateralwärtsdreher), welche auch bei der Senkung des Blickes nicht mehr zur Geltung komme, so dass bei Senkung der Blickebene in stärkerem Grade immer zugleich Convergenz ein-

räte. — Auch beim Nahesehen hat nach Hering der binoculare Blickraum viel ngere Grenzen, als sie sich nach der Excursionsfähigkeit des einzelnen Auges rwarten lassen.

Eine Bestimmung des Blickraumes, d. h. des Inbegriffs der sämmtlichen inocularen Blickfelder von der Parallelstellung bis zur stärksten Convergenz-tellung ist bisher nicht gemacht worden. Vermuthlich ist der binoculare Blick-aum ein Kegel, dessen Spitze bei vollständiger Symmetrie der Augenmuskeln in er Medianebene und in der Gegend der Nasenspitze gelegen ist, dessen Basis die urch die punktirte Linie in Figur 109 begrenzte Ebene, in sehr grosse Ent-ernung projicirt und entsprechend vergrössert, bilden würde.

Von den im Anfange dieses Paragraphen gestellten Postulaten ist nur noch rmittelt worden die stärkste Convergenzstellung, welche wir den Augen zu eben im Stande sind. Donders (Arch. f. Ophthalm. 1860, VI. 1, 85 und Ano-nalien der Refraction etc. 1866, p. 94) nimmt den stärksten Convergenzwinkel u 70° an, entsprechend bei einer Distanz der Drehpunkte von 64 Mm. einer ntfernung des binoculär fixirten Punktes von dem Mittelpunkte der Grundlinie = 46 Mm., Schuurmann (III. 1 dieses Handbuches p. 235) nimmt diese Ent-ernung = 81,2 Mm. an, was einem Convergenzwinkel von nur 43° entsprechen ürde, also für die Innenwendung jedes Auges der Hälfte dieser Winkel.

§ 75. Ungewöhnliche Augenbewegungen. — Wir haben noch ver-chiedene Arten von Augenbewegungen zu erwähnen, welche wir nicht zu den wecken des Sehens anwenden, welche wir nicht zur Orientirung im Raume be-utzen. Es würden dahin eigentlich auch die sehr starken Convergenzbewegungen, enen die Accommodation nicht mehr zu folgen im Stande ist, die angestrengten rhebungen, Senkungen und Seitenwendungen der Augen gehören, da wir diese urch Bewegungen des Kopfes und Körpers unnöthig zu machen pflegen. Wir önnen aber durch besondere Veranstaltung unsere Augen auch bewegen ohne ücksicht auf die Zwecke des Sehens: dahin gehören

1) Divergenzstellungen der Gesichtslinien und Erhebung nur des einen Auges.
2) Rollungen um die Gesichtslinien bei aufrechter Kopfhaltung.
3) Rollungen bei Neigung des Kopfes (schulterwärts).

1) Divergenz der Gesichtslinien kann eingeübt werden durch Betrachtung ereoscopischer Bilder, wenn man sie immer weiter von einander entfernt und abei ihre Vereinigung zu einem Bilde zu erhalten sucht. Helmholtz (Physiol. ptik p. 475) hat eine Divergenz der Blicklinien bis zu 8° hervorbringen gelernt. asselbe lässt sich, wie Helmholtz angiebt, erreichen, wenn man zwei gleiche, hwach brechende Prismen von 6° bis 8° brechendem Winkel so vor beide Augen immt, dass die brechenden Winkel nach unten gerichtet sind, nach entfernten bjecten blickt, und diese fortfährt zu fixiren, während man die Prismen all-älig so dreht, dass ihre brechenden Winkel nach aussen gerichtet sind: er-heint das Object dann noch einfach, so müssen die Gesichtslinien divergiren. ering (Binoc. Sehen p. 46) hat es nach jahrelanger Uebung dahin gebracht, bei ark gehobener Blickebene die Gesichtslinie nahezu um 5° divergiren zu lassen, so eine Divergenz von 10° im Ganzen zu erzeugen.

In analoger Weise haben Donders, Helmholtz und Hering sich geübt, eine

Vereinigung der Bilder festzuhalten, wenn mittelst eines schwachen Prismas die Blicklinie des einen Auges nach oben oder unten abgelenkt wird, während die des andern Auges unverändert bleibt. Dasselbe lässt sich, wie Hering fand (l. c. p. 15), auch erreichen, wenn man von zwei zusammengehörigen Stereoscopbildern das eine etwas höher hält, als das andere. Dass unter diesen Umständen die beiden Blicklinien nicht gleich hoch gerichtet sind, ergiebt sich daraus, dass nach Wegnahme des Prismas die betreffenden Doppelbilder über einander stehend wahrgenommen werden und dieselben erst allmälig wieder verschmelzen.

2) Auf ähnliche Weise glaubte Helmholtz (Physiologische Optik p. 476) auch Rollungen des einen Auges um die Gesichtslinie mit Hilfe rechtwinkliger Prismen hervorbringen zu können: legt man zwei rechtwinklige Prismen mit ihren Kathetenflächen so aneinander, dass die Hypotenusenfläche des einen nach unten, die des andern nach oben gerichtet ist, so wird die Umkehrung der Bilder von Objecten, welche das eine Prisma durch totale Reflexion hervorbringt, durch das andere Prisma wieder vollständig aufgehoben und die Gegenstände erscheinen in ganz unveränderter Lage. Macht man aber die Hypotenusenflächen der beiden Prismen nicht ganz parallel, sondern dreht das eine Prisma ein wenig um eine dem durchgehenden Strahle parallele Axe, so werden die gesehenen Gegenstände um den ungebrochenen Strahl ein wenig gedreht und es erscheinen gekreuzte Doppelbilder. Diese können nach Helmholtz zur Verschmelzung gebracht werden: nach Wegnahme der Prismen erscheinen im ersten Moment gekreuzte Doppelbilder. Hering (Binoc. Sehen p. 62) hat die Richtigkeit dieser Beobachtung in Zweifel gezogen, weil Helmholtz die Kathetenflächen aneinander um eine zu ihnen Normale gedreht und dadurch ein Auseinandertreten der Bilder, nicht eine einfache Kreuzung bewirkt habe. — Ich muss mich Hering's Zweifeln, dass man nach Helmholtz' Methode eine Rollung bewirken könne, anschliessen und finde auch für meine Augen eine Rollung nicht erreichbar, wenn ich statt der Prismendrehung eine Drehung eines Stereoscopbildes anwende.

3) Ueber die Rollung der Augen bei Neigung des Kopfes sind schon von Hueck (Die Achsendrehung des Auges. Dorpat 1838) Untersuchungen angestellt worden, aus welchen derselbe schloss, dass bei Neigung des Kopfes nach der einen oder andern Schulter hin eine Drehung des Augapfels in entgegengesetztem Sinne und von einer solchen Grösse stattfände, dass der verticale Meridian der Netzhaut seine verticale Lage im Raume behielte. Dieses Resultat der Hueck'schen Versuche ist von Tourtual (Müller's Archiv 1840, p. LV.) und namentlich von Donders (Holländische Beiträge 1848, p. 118) als unrichtig nachgewiesen. Donders fand sowohl bei der Methode der Beobachtung bestimmter Conjunctiva- und Irisstellen, als bei der Methode mit Nachbildern (§ 70), dass bei derartigen Kopfneigungen gar keine Rollung einträte. Später hat indess Javal (Wecker, Etudes ophthalmologiques T. II. 1866, p. 815) mittelst Bestimmung an astigmatischen Augen nachgewiesen, dass allerdings eine kleine Rollung bei Neigung des Kopfes eintritt, was auch Reuss und Woinow (Ophthalmologische Studien 1869, p. 27) behaupteten. Obgleich Aub (Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde 1870, I. 2, p. 234) nachgewiesen zu haben glaubte, dass das Auge bei Neigungen des Kopfes keine Rollungen ausführt, so haben bald darauf Skrebitzky (Arch. f. Ophthalm. 1871, XVII. 1, p. 112) unter Donders' Leitung und Nagel (Arch. f. Ophthalm. 1871, XVII. 1, p. 243) den Beweis geführt, und zwar mit-

telst der Nachbildermethode, dass bei Neigungen des Kopfes schulterwärts und unverrückter Fixation eines Punktes, der mit dem Kopfe verbunden ist und in der Höhe der Augen liegt, eine Rollung im Sinne Hueck's wirklich statt hat, aber nur in geringem Umfange, nämlich für je 10° Kopfneigung ungefähr eine Rollung von etwas mehr als 1° in entgegengesetztem Sinne — oder nach Nagel von etwa dem sechsten Theil der Kopfneigung.

Skrebitzky giebt folgende Mittelzahlen an:

Kopfneigung:	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°
Rollung:	2°	2,64°	4,16°	5,48°	6,76°	7,72°	8,60°.

Etwas andere Zahlen hat Mulder (Onderzoekingen in het Physiologisch Laboratorium te Utrecht 1875, Derde Reeks III. 1, p. 134 und Arch. f. O. 1875, XXI. 1, p. 68) an sich und Dr. Küster erhalten, und namentlich bei sich selbst gefunden, dass bei Neigung des Kopfes über 50° die Rollung nicht weiter zunimmt. Ausserdem fand Mulder Verschiedenheiten in der Rollung bei längerer oder kürzerer Dauer der Kopfneigung, und unterscheidet bleibende und vorübergehende Rollungen. Bezüglich der angewandten Methode und der Erklärung der Rollung verweisen wir auf das Original.

Mit den Neigungen des Kopfes findet nun, wie ich (Archiv für pathologische Anatomie 1860, XX. p. 381 und Physiologie der Netzhaut p. 275) gefunden habe, eine eigenthümlich unrichtige Auslegung des Wahrgenommenen statt, indem, wenn keine bekannten Objecte da sind, nach welchen man sich orientirt, verticale Linien bei Neigung des Kopfes nach der rechten Schulter stark nach links, bei Neigung des Kopfes nach der linken Schulter stark nach rechts geneigt erscheinen. Diese Täuschung tritt z. B. auf, wenn man eine helle verticale Linie im übrigens dunkeln Zimmer mit geneigtem Kopfe mehrere Sekunden lang betrachtet: so wie man aber in das Zimmer Licht einlässt, dreht sich die Linie langsam in die verticale Lage zurück. — Es geht daraus am schlagendsten hervor, dass es sich hier nicht um Rollungen, sondern nur um eine Auslegung oder um eine falsche Orientirung handelt, welche, wie ich wahrscheinlich gemacht habe, darauf beruht, dass wir aufhören, uns der abnormen Stellung unseres Kopfes bewusst zu sein. Ob diese Erklärung stichhaltig ist, wird durch Mulder's Versuche (l. c. p. 169) zweifelhaft — die Erklärung von Helmholtz (Physiol. Optik p. 618), dass man die Neigung des Kopfes für kleiner halte, als sie wirklich ist, kann ich nach meinen Beobachtungen auch nicht als zutreffend ansehen. (cf. Breuer, Ueber die Function der Bogengänge des Ohrlabyrinthes. Medicinische Jahrbücher, Wien 1874, Heft I. p. 47.) — Die Beobachtung, welche vielfach bestätigt worden ist, ist von Bedeutung für die Abhängigkeit unserer Orientirung von der Lage des Kopfes und des Körpers.

§ 76. Innervation der Augenmuskeln und Princip der Augenbewegungen. — Es ist schon in § 71 darauf aufmerksam gemacht worden, dass eine sehr bestimmte Association der Bewegungen beider Augen oder des Doppelauges stattfindet, und wir haben in den folgenden Paragraphen gesehen, dass die Bewegungen der Augen, so weit die Zwecke des Sehens in Betracht kommen, mit einer wunderbaren Regelmässigkeit und Gesetzmässigkeit nach dem Listing'schen und Donders'schen Gesetze erfolgen. Diese Gesetzmässigkeit zwingt zu der Annahme, dass ein bestimmter Rapport zwischen den Eindrücken auf

unsere Doppelnetzhaut und den Bewegungsorganen der Augen vorhanden ist, welcher durch ein nervöses Centralorgan vermittelt werden muss, und welcher einen bestimmten Zweck, ein bestimmtes Princip für die gesammte Innervation unseres Sehorganes zur Voraussetzung hat.

Wenn auf die Erregung eines Punktes unserer Netzhaut eine nach Richtung und Grösse bestimmte Bewegung unseres Doppelauges mit bestimmter Accommodation desselben ohne Weiteres erfolgt, so setzt dies ein Centralorgan voraus, in welchem die Eindrücke auf unsere Netzhaut und unsere Sehnerven übertragen werden auf bestimmte Gruppen nervöser Substanz, welche ihrerseits die Muskelnerven in feststehender Ordnung und Intensität erregen. Es ist aber festgestellt, dass, wie Hering (Binoculares Sehen p. 38) es ausdrückt, »der Ort des indirecten Bildes auf der Netzhaut zugleich das bestimmende Moment für die nothwendige Bewegungsinnervation« ist, und zwar für die Innervation der Augenmuskeln, des Accommodationsmuskels und der den Kopf bewegenden Muskelgruppen.

Eine Kenntniss der hierzu erforderlichen Anordnung der Nervenbahnen fehlt uns bis jetzt allerdings vollständig und es ist überhaupt erst durch Adamük's Versuche (Onderzoekingen in het Physiologisch Laboratorium der Utrecht'sche Hoogeschool, Tweede Reeks III. 1870, p. 140 u. Centralblatt für die medicinischen Wissenschaften 1870, p. 65) das Organ des Gehirns, zunächst allerdings nur bei Hunden und Katzen, bekannt geworden, welches als das Innervationscentrum anzusehen ist. Dieses Organ sind die vorderen Hügel der *Corpora quadrigemina*.

Adamük's in Donders' Laboratorium angestellte Versuche haben folgende wichtige Resultate geliefert: 1) der rechte vordere Hügel beherrscht die Bewegungen beider Augen nach links, der linke die Bewegungen beider Augen nach rechts. Bei der Reizung verschiedener Punkte bewegen sich immer beide Augen zugleich und in derselben Richtung. Erst nach Trennung der beiden Hügel durch einen tiefen Schnitt beschränkt sich die Bewegung auf die Seite der Reizung. Adamük findet daher, dass Hering's Ausdruck »Doppelauge« den Erscheinungen sehr angemessen ist. 2) Sind die Augen vor der Reizung divergirend ein wenig nach unten gerichtet, so nehmen bei Reizung des mittelsten vorderen Theils der Vorderhügel, d. h. der hinteren Commissur, die Gesichtslinien sogleich Parallelstellung ein — bei Reizung etwas weiter nach hinten erfolgt Bewegung beider Augen nach oben, und zwar um so mehr nach oben, je weiter nach oben und hinten, d. h. nach der Mitte der vorderen Hügel man reizt, und um so mehr nach unten, je mehr nach unten und aussen gereizt wird. Bei diesen Bewegungen bleibt die Pupille unverändert. 3) Reizung der Mitte der vorderen Hügel bringt sogleich Bewegung der Augen nach oben mit gleichzeitiger starker Erweiterung der Pupille hervor. Die Augenstellung geht um so mehr in eine horizontale über, je weiter man mit der Reizung in der Mitte nach vorn geht, und wird um so mehr Convergenzstellung, je weiter die Elektroden nach hinten angesetzt werden — bei Reizung der hintersten Theilungsstelle des einen der beiden Hügel tritt Senkung, starke Convergenz und Verengerung der Pupille ein. — Reizung des Bodens des *Aquaeductus Sylvii* ruft starke Wendung der Augen nach innen (medianwärts) hervor, ebenso wie die Reizung des *N. oculomotorius*. 4) Jede Bewegung nach innen und unten ist mit Verengerung der Pupille verbunden. 5) Die Stelle für die Bewegung nach unten in Parallelstellung hat Adamük nicht auffinden können, vermuthet aber, dass sie am Boden der Hügel gelegen sei. 6) Bei stärkerer Reizung des linken oder rechten Hügels dreht sich auch der Kopf in gleichem Sinne wie die Augen.

Jedenfalls ist durch Adamük's Versuche festgestellt, dass die Association der Bewegungen und die ganze Innervation auf anatomischer Gruppirung der Nerven-

elemente, auf einem anatomisch gegebenen Mechanismus beruht, und dass dieser Mechanismus ein angeborener ist, da Adamük, wie Donders (Onderzoekingen etc. II. R. III. p. 154 und Arch. f. Ophthalm. 1871, XVIII. 2, p. 164) angiebt, an ganz jungen Thieren, deren Augen sich eben erst geöffnet hatten, seine Versuche angestellt hat. Da die Associationen der Augenbewegungen beim erwachsenen Menschen unbewusst in sehr ähnlicher Weise erfolgen, wie bei Adamük's jungen Hunden, und höchstens einmal ein Physiologe diese Associationen zu stören unternimmt und mit geringem Erfolge zu stören fertig bringt (cf. § 75), — wir anderseits bei andern Thieren (am auffallendsten beim Chamaeleon) ganz andere Gruppirungen der Bewegungen, welche eben so angeboren sind, finden, so kann ich auf dem Boden der Erfahrung nur einen auf anatomischen Einrichtungen beruhenden, angeborenen und prästabilirten Zwang, unter welchem wir die Augenbewegungen ausführen, annehmen. Ich schliesse mich also in dieser Frage Hering (Binoc. Sehen p. 18 u. f.) unbedingt an gegen Helmholtz (Physiol. Optik p. 799) und Donders (l. c.).

Adamük hat also gefunden 1) ein Organ für die Seitenwendungen des Doppelauges, 2) ein Organ für die Erhebung, 3) ein Organ für die Senkung mit Convergenzbewegung und Pupillenverengerung, 4) ein Organ für Convergenzbewegung mit Pupillenverengerung — also Organe oder Zellengruppen für die in § 71 unterschiedenen Hauptklassen der Augenbewegungen.

Besonders hervorzuheben ist der in den Versuchen Adamük's hervortretende Zusammenhang von Convergenzbewegung mit Pupillenverengerung, welche, wie gleichfalls Adamük (Centralblatt für die medicin. Wissenschaften 1870, p. 177) nachgewiesen hat, durch Reizung des *N. oculomotorius* hervorgebracht werden können und dann meistens vergesellschaftet sind, obgleich besondere Fasern in diesem Nerven, welche die Verengung der Pupille bewirken und das *Ganglion ciliare* durchsetzen, vorhanden sind, Fasern, welche Adamük in 3 von 42 Fällen im *N. abducens* verlaufend gefunden hat. — Wenn man mit diesen Versuchen Adamük's am Oculomotorius die in § 16 angegebenen Versuche von Hensen und Völckers zusammenhält, so kann man wohl mit hoher Wahrscheinlichkeit weiter schliessen, dass, wo von Adamük Pupillenveränderung beobachtet wurde, auch Accommodation stattgefunden habe. — Wir müssen dann für die so äusserst gesetzmässige Correlation von Convergenz und Accommodation, welche Donders (Arch. f. Ophthalm. 1860, VI. 1, p. 87 und Anomalien der Refraction etc. 1866, p. 94) nachgewiesen hat, ein gemeinschaftliches anatomisches Organ in der hinteren Mittelfurche zwischen den vorderen Vierhügeln annehmen, welches den convergenzvermittelnden und den pupillenverengenden und accommodationvermittelnden Nervenfasern gemeinsam vorsteht.

Dass dieser Zusammenhang, welcher zwischen Accommodation und Convergenz besteht, künstlich gelöst werden kann (cf. Hering, Binoc. Sehen p. 137), ist auch bei der Annahme eines solchen gemeinsamen Centralorganes sehr begreiflich, da dieses Centralorgan verschiedene Antagonisten hat, nämlich das Centralorgan für die Seitenwendungen und das Organ für die Pupillenerweiterung (Sympathicus). Immerhin wird die Wirkung von Antagonisten mit Erfolg kein Beweis sein für den ursprünglich gegebenen und angeborenen Zusammenhang zweier Functionen.

Die bestehende Gesetzmässigkeit unserer Augenbewegungen und ihre Ver-

kettung mit Eindrücken auf unserer Netzhaut führt uns endlich zu der Frage, ob dieser Verbindung unserer Wahrnehmungen mit den Bewegungen ein gemeinschaftliches Princip zu Grunde liege? oder ob irgend ein gesondertes Princip den Bewegungen und ein anderes den Wahrnehmungen zu Grunde liege. Es ist von Fick (Zeitschrift f. rat. Med. Neue Folge 1854, IV. p. 101) und Wundt (Arch. f. Ophthalmologie 1862, VIII. 2, p. 46) angenommen worden, dass das Princip für die Augenbewegungen auf der Bewegung mit der geringsten Muskelanstrengung beruhe, und sie haben dieses Princip mit Zugrundelegung der anatomischen Verhältnisse der Augenmuskeln durchzuführen versucht. Gegenüber den Interessen des Sehens scheint mir der grössere oder geringere Aufwand von Muskelkraft nicht erheblich, besonders im Hinblick auf die geringen Kräfte, welche zur Bewegung des Augapfels überhaupt erforderlich sind, und auf den geringen Grad von Contraction, welcher gerade bei den Augenmuskeln stattfindet (§ 69). Wenn wir aber den Organismus als im höchsten Grade zweckmässig construirt ansehen, so kann man annehmen, dass auch dieses Princip trotz untergeordneter Bedeutung durchgeführt sei. Wäre dieses Princip sicher festgestellt, so würde damit nicht ausgeschlossen sein ein Princip, welches die Bewegungen des Auges in Beziehung setzt zu den Wahrnehmungen desselben. Ein solches Princip ist zuerst von Meissner (Beiträge zur Physiologie des Sehorgans 1854, p. 93) aufgestellt worden, welcher als das einfachste und natürlichste Princip für die Augenbewegungen ansieht, »dass das ganze Auge bei jeder Stellung ein und dieselbe Orientirung zu seinem Gesichtsfelde behält.« Dieses Meissner'sche Princip ist denn auch später von Helmholtz (Arch. f. Ophthalm. 1863, IX. 2, p. 158) angenommen und in der Form des Princips der leichtesten Orientirung auf Grund des Listing'schen Gesetzes durchgeführt worden, und auch Hering (Binoculares Sehen 1868, p. 106) hat dieses Princip im Wesentlichen in ähnlicher Form wie Meissner hingestellt. — Es wird kaum ein Princip ausgesprochen werden können, welches den Interessen des Sehens mehr Rechnung trüge, und man wird, wenn dieses Princip die Prüfung besteht, das bewegte Auge geradezu als ein ruhendes mit erweitertem Gesichtskreise und erweiterter Wahrnehmungsfähigkeit betrachten können. Wenn wir uns vorstellen, dass unser Auge gleichzeitig die ganze Reihe von Bildern eines Objectes hätte, welche es im Laufe kurzer Zeit durch Bewegung der Blicklinie an dem Objecte hin gewinnt, so würde es im ersteren Falle eine kaum grössere Wahrnehmungsfähigkeit haben: im ersten Falle würde aber die Anordnung der Bilder eine in Bezug auf das Object constante sein, im zweiten Falle nur dann, wenn die Localisirung des Auges dieselbe bliebe. Dies ist aber der Fall in so weit, als das Donders'sche und das Listing'sche Gesetz Geltung haben, und wir haben in § 72 und 73 gesehen, dass die Abweichungen von demselben beim gewöhnlichen Sehen nicht sehr bedeutend sind. Nach diesen Gesetzen ist aber, wie Hering es ausdrückt, die räumliche Wahrnehmung des bewegten Auges in möglichsten Einklang gebracht mit den Wahrnehmungen des unbewegten Auges, indem die Rollungen um die Gesichtslinie möglichst vermieden sind, und wir können nach den bisherigen Untersuchungen sagen, dass die Interessen der einheitlichen Wahrnehmung massgebend für die Bewegungen der Augen zu sein scheinen.

Literatur.

Allgemeine Werke.

§ 1. Kircher, Ars magna lucis et umbrae in X libros digesta. Amstelodami 1761. — Fabricius ab Aquapendente, Opera omnia anatomica et physiologica. Lipsiae 1687. p. 187 bis p. 248. Die ältere Literatur findet sich sehr vollständig in: Haller, Elementa Physiologiae. Lausannae 1763. T. V. p. 306 bis p. 528 und in Priestley, Geschichte der Optik, aus dem Englischen mit Anmerkungen und Zusätzen von Klügel. Leipzig 1776. — Smith, Vollständiger Lehrbegriff der Optik, mit Aenderungen und Zusätzen ausgearbeitet von Kästner. 1755. (Enthält Jurin, Abhandlung vom deutlichen und undeutlichen Sehen p. 483—514). — Porterfield, A treatise on the Eye, the Manner and Phaenomena of Vision. Edinburgh 1759. 2 Bde. — Le Cat, Traité des sens. Amsterdam 1744. — J. Müller, Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1826. —— Handbuch der Physiologie des Menschen. Bd. II. Abth. 2. Coblenz 1838. p. 250—393. — Tourtual, Die Sinne des Menschen. Münster 1827. — Volkmann, Neue Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. Leipzig 1836. — Burow, Beiträge zur Physiologie und Physik des menschlichen Auges. 1842. — Ruete, Lehrbuch der Ophthalmologie. Erste Ausgabe 1854. p. 1—194. Zweite Ausgabe 1854. I. — Volkmann, Sehen. Im Handwörterbuch der Physiologie, herausgegeben von R. Wagner. 1846. Bd. III. 1. p. 265—351. — Cornelius, Die Theorie des Sehens und räumlichen Vorstellens. Halle 1861. — Scheffler, Die physiologische Optik. Braunschweig 1864. (Als Supplement dazu: Die Gesetze des räumlichen Sehens. Braunschweig 1866.) — Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik. Leipzig 1867. (IX. Band der Allgemeinen Encyclopädie der Physik, herausgegeben von G. Karsten.) —— Optique physiologique, traduit par Javal et Klein. Paris 1867. — Kaiser, Compendium der physiologischen Optik. Wiesbaden 1872. — Newton, Opticks, or treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light. 2 Edit. London 1717. — Brewster, Handbuch der Optik. Deutsch von Hartmann. 1835. — Radicke, Handbuch der Optik 1839. Bd. II. — A. Fick, Die Medicinische Physik. Braunschweig 1856. Zweite Auflage von 1866. —— Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Sinnesorgane. Lahr 1864. — Wüllner, Lehrbuch der Experimentalphysik (I. Band 2. Abtheilung: Optik). Leipzig 1863. — Jahresberichte in Müller's Archiv für 1833 bis 1837 von Joh. Müller, für 1838 bis 1842 von Tourtual. — Jahresbericht über die Fortschritte der gesammten Medicin in allen Ländern von Canstatt und Eisenmann. Physiologie 1844—65 von Valentin. Physiologische Physik seit 1851 von Heidenreich, seit 1856 von Fick. — Fortschritte der Physik. Berlin seit 1845 bis jetzt. — G. Meissner, Jahresberichte über die Fortschritte der Physiologie von 1856 bis 1871 in den Berichten über die Fortschritte der Anatomie und Physiologie von Henle und Meissner. Leipzig und Heidelberg 1857 bis 1872. (Als besondere Abtheilung der Zeitschrift für rationelle Medicin.) Fortgesetzt seit 1872: Jahres-

bericht über die Fortschritte der Anatomie und Physiologie von Hoffmann und Schwalbe. — Nagel, Jahresbericht für Ophthalmologie seit 1870. (Bis jetzt erschienen I—IV. 1870—1873.) Physiologie des Auges: Referent Prof. Nagel.

I. Dioptrik.

§ 2. Cotes in Smith a complete system of Opticks. Cambridge 1738. II. rem. p. 76 (in der deutschen Bearbeitung von Kästner nicht enthalten.) — Euler, Règles générales pour la construction des telescopes et microscopes de quelque nombre de verres qu'ils soient composés. Histoire de l'Acad. de Berlin pour 1757. Berlin 1759 p. 283 — 1768 p. 201. — Précis d'une théorie générale de la dioptrique. Histoire de l'Acad. de Paris 1765 p. 555. — Lagrange, Sur la théorie des lunettes. Nouv. Mém. de l'Académie de Berlin 1780, p. 162. — Sur une loi générale d'optique ibid. Berlin 1805, Classe mathématique p. 1. — Piola, Sulla theoria de' cannocchiali in: Effemeridi astronom. di Milano. Milano 1821. — Möbius, Kurze Darstellung der Haupteigenschaften eines Systems von Linsengläsern in: Crelle Journal für Mathematik 1830, Bd. 5, p. 513 und Bd. 6, p. 215. — Bessel, Ueber die Grundformeln der Dioptrik in: Astronomische Nachrichten. Altona 1841. Bd. 18, p. 97. — Gauss, Dioptrische Untersuchungen. Göttingen 1841. (Besonderer Abdruck aus Abhandlungen der Kön. Ges. d. Wiss. zu Göttingen. T. I. 1838—1843.) — Encke, De formulis dioptricis. Programm. Berlin 1844. — Moser, Methode, die Brennweite und optischen Hauptpunkte von Linsen zu bestimmen. Poggendorff's Annalen 1844. Bd. 63, p. 39. — Listing, Beitrag zur physiologischen Optik. Göttingen 1845. (Abdruck aus den Göttinger Studien 1845.) —— Dioptrik des Auges in Handwörterbuch der Physiologie, herausgegeben von Wagner Bd. IV. p. 451. Braunschweig 1853. — Möbius, Entwickelung der Lehre von dioptrischen Bildern mit Hülfe der Collineationsverwandtschaft. Berichte der Leipziger Gesellschaft der Wissenschaften 1855, p. 8. — Zehender, Anleitung zum Studium der Dioptrik des menschlichen Auges. Erlangen 1856. — J. Müller, Zur Dioptrik der Linse. Poggendorff's Annalen 1866. Bd. 130, p. 100. — Neumann, Die Haupt- und Brennpunkte eines Linsensystems. Leipzig 1866. — Listing, Ueber einige merkwürdige Punkte in Linsen und Linsensystemen. Poggendorff's Annalen 1866. Bd. 129, p. 466. — Gerold, Die ophthalmologische Physik. Wien 1869. — Reusch, Constructionen zur Lehre von den Haupt- und Brennpunkten eines Linsensystems. Leipzig 1870. — Töpler, Bemerkungen über die Anzahl der Fundamentalpunkte eines beliebigen Systems von centrirten brechenden Kugelflächen. Poggendorff's Annalen 1871. Bd. 142, p. 232. — Hansen, Untersuchung des Weges eines Lichtstrahles durch eine beliebige Anzahl von brechenden sphärischen Oberflächen. Leipzig 1871. — Lippich, Fundamentalpunkte eines Systems centrirter brechender Kugelflächen. Graz 1871. (Abdruck aus Bd. II. der Mittheilungen des naturwissenschaftlichen Vereins für Steiermark.) — V. von Lang, Zur Dioptrik eines Systems centrirter Kugelflächen. Wiener Akademie-Berichte 1873, Bd. 63, p. 666. Poggendorff's Annalen 1873, Bd. 149, p. 353. — J. Müller in Freiburg, Die Beziehungen der Brennweite und der conjugirten Punkte einer Linse durch eine neue Formel dargestellt. Poggendorff's Annalen 1874. Jubelband p. 460. — Kiessling, Die Brechung der Lichtstrahlen im Auge. Hamburg. (Schulprogramm 1874, nicht im Buchhandel.) — Hirschberg, Zur Dioptrik des Auges. I. Die Brechung homocentrischer paraxialer Strahlenbündel in einem beliebigen centrirten System kugliger Flächen. Centralblatt für die medicin. Wissensch. 1875, p. 769.

§ 3. Petit, Mémoires sur les yeux etc. in Mémoires de l'Academ. de Paris 1723, 1726, 1728, 1730. — David Brewster, A Treatise on new Philosophical Instruments. Edinburgh 1813, p. 243. (Brechungsexponenten.) — Chossat, Mémoire sur le pouvoir réfringant des milieux de l'oeil, Annales de Chimie et de Physique 1818. T. III. p. 217. — Biot, Lehrbuch der Experimentalphysik. Bearbeitet von Fechner 1828. Bd. IV.

p. 468. — Cahours et Becquerel, Recherches sur les pouvoirs réfringents des liquides. Compt. rend. 1840. T. 11, p. 867. — Brücke, Ueber das Verhalten der optischen Medien des Auges gegen Licht- und Wärmestrahlen. Müller's Archiv 1845, p. 262. — Engel, Zur Physik des Auges. Prager Vierteljahrschrift 1850, Bd. I, p. 152. (cf. Ryba, Prüfung des Brechungsvermögens durchsichtiger Körper ibid. 1852, Bd. II. p. 95 und Mayer ibid. 1851, Bd. IV. p. 92.) — W. Krause, Die Brechungsindices der durchsichtigen Medien des menschlichen Auges. Hannover 1855. — Zehender, Ueber die Brewster'sche Methode zur Bestimmung der Brechungsexponenten flüssiger oder festweicher Substanzen. Arch. f. Ophth. 1857. III. 1, p. 99. — Fleischer, Neue Bestimmungen der Brechungsexponenten der durchsichtigen flüssigen Medien des Auges. Inaug. Diss. Jena 1872. — Abbe, Neue Apparate zur Bestimmung des Brechungs- und Zerstreuungsvermögens fester und flüssiger Körper. Jena 1874. — Woinow, Ueber die Brechungscoefficienten der verschiedenen Linsenschichten. Briefl. Mitth. in Monatsblätter für Augenheilkunde Jahrg. XII. 1874, p. 407. — Hirschberg, Ueber Bestimmung der Brechungsindices der flüssigen Medien des menschlichen Auges. Centralblatt für d. medicin. Wissenschaften 1874. No. 13. —— Ophthalmologische Studien. Wiesbaden 1874. (Separatabdruck aus: Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde Bd. IV. 1, p. 1.): Ueber das Brechungsverhältniss der flüssigen Medien des menschlichen Auges. — L. Hermann, Ueber schiefen Durchgang von Strahlenbündeln durch Linsen und eine darauf bezügliche Eigenschaft der Krystalllinse. Gratulationsschrift an C. Ludwig, Zürich 1874 und Poggendorff's Annalen 1874, Bd. 153, p. 470.

§ 1—12. Thomas Young, On the mechanisme of the eye. Philos. Transactions 1801. P. I. p. 23. — C. Krause, Einige Bemerkungen über den Bau und die Dimensionen des menschlichen Auges. Meckel's Archiv 1832, Bd. VI. p. 86 und Poggendorff's Ann. 1834, Bd. 31, p. 93. Fortsetzung Poggendorff's Annalen 1836, Bd. 39, p. 529. — Senff s. Volkmann, Art. Sehen in Handwörterbuch der Physiologie 1846, III. 1, p. 271, 289 und 302. — Helmholtz, Ueber die Accommodation des Auges. Arch. f. Ophth. 1853, I. 2, p. 1. — Knapp. Die Krümmung der Hornhaut des menschlichen Auges. (Habilitationsschrift) Heidelberg 1859. —— Ueber die Lage und Krümmung der Oberflächen der menschlichen Krystalllinse und den Einfluss ihrer Veränderungen bei der Accommodation auf die Dioptrik des Auges. Arch. f. Ophth. 1860, VI. 2, p. 1. cf. VII. 2, p. 136. — Meyerstein, Beschreibung eines Ophthalmometers nach Helmholtz. Poggendorff's Annalen 1860, Bd. 111, p. 415. — Middelburg, De Zitplaats van het Astigmatisme. Utrecht 1863. — Mandelstamm, Zur Ophthalmometrie. Archiv für Ophth. 1865, XI, 2, p. 259. — Rosow, Zur Ophthalmometrie. Arch. f. Ophth. 1865, XI. 2, p. 129. (Sonnenlicht.) — Donders, Die Anomalien der Refraction und Accommodation des Auges. Deutsch von O. Becker. Wien 1866. — Reuss und Woinow, Ophthalmometrische Studien. Wien 1869. — Mauthner, Ueber den Winkel α, in Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde 1869, p. 481 und Wiener Medicinische Presse 1869, No. 34—37. — Strawbridge, Ophthalmometrische Messungen, in Sitzungsberichte der Ophthalmologischen Gesellschaft. Klinische Monatsblätter, Stuttgart 1869, p. 480. — Woinow, Weitere Beiträge zur Kenntniss des Winkels α. Arch. f. Ophth. 1870, XVI. 1, p. 225. —— Ophthalmometrie. Wien 1871. — Mandelstamm und Schöler, Eine neue Methode zur Bestimmung der optischen Constanten des Auges. Arch. f. Ophth. 1872, XVIII. 1, p. 155. — Reich, Einige Resultate ophthalmometrischer und mikrooptometrischer Messungen. Arch. f. Ophth. 1874, XX. 1, p. 207. — Bauer, Ueber den scheinbaren Ort eines in einem dichteren durchsichtigen Medium befindlichen, sowie eines durch eine sogenannte planparallele Platte beobachteten Lichtpunktes. Poggendorff's Annalen 1874, Bd. 153, p. 572. — Hirschberg, Zur ophthalmometrischen Rechnung (Ableitung der Grundformel für den Krümmungsradius eines beliebigen Ellipsenpunktes). Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde 1874, III. 2, p. 160. — Mönnich, Untersuchungen über die scheinbare Ortsveränderung eines leuchtenden

Punktes durch ein von zwei parallelen Ebenen begrenztes lichtbrechendes Medium. Rostock 1875.

§ 13—15. Scheiner, Oculus sive fundamentum opticum. Oeniponti 1619, p. 32. — Pemberton, De facultate oculi, qua ad diversas distantias se accommodat. Diss. inaug. Lugduni Batavorum 1719. (Formveränderung der Krystalllinse behauptet.) — Olbers, De oculi mutationibus internis. Diss. inaug. Göttingen 1780. (Linsenbewegung.) — Hueck, Die Bewegung der Krystalllinse. Dorpat 1839. — Thalheim, De oculi mechanismo, imprimis vi obiectis se accommodandi. Diss. inaug. Halle 1842. — Brücke, Ueber den Musculus Cramptonianus und den Spannmuskel der Chorioidea. Berliner Akademie-Berichte 1846, 29. Mai. Müller's Archiv 1846, p. 370. — Max Langenbeck, Klinische Beiträge aus dem Gebiete der Therapie und Ophthalmologie. Göttingen 1849. Heft I. — Cramer (in Groningen), Het Accommodatievermogen der Oogen. Haarlem 1853. Uebersetzt von Doden. Leer 1855. (Auszug in Fechner, Centralblatt für Naturwissenschaften. II. Jahrgang 1854, p. 121.) — L. und A. Fick, Ueber die Adaption (Accommodation) des Auges. Müller's Archiv 1853, p. 449. — Ruete, Ueber angebornen Irismangel und dessen Einfluss auf die Accommodation. Virchow's Archiv 1855, XII. p. 342. — Czermak, Von den Accommodationslinien. Physiologische Studien, p 1 und Wiener Akademie-Berichte 1854, Bd. XII. p. 322 und ibid. 1855, Bd. XV. p. 425. — Arlt, Zur Anatomie des Auges. Archiv für Ophth. 1856, III. 2, p. 87. — Czermak, Ueber das Accommodationsphosphen. Wiener Akademie-Berichte 1857, Bd. 27, p. 78 und Arch. f. Ophthalm. 1860, VII. 1, p. 147. — Vierordt, Versuche über die Zeitverhältnisse des Accommodationsvermögens im Auge. Archiv f. physiol. Heilk. 1857. Neue Folge I. p. 17. — Mannhardt, Bemerkungen über den Accommodationsmuskel und die Accommodation. Arch. f. Ophth. 1858, IV. 1, p. 269. — Henke, Der Mechanismus der Accommodation für Nähe und Ferne. Arch. f. Ophth. 1860, VI. 2, p. 53. — Aeby, Die Accommodationsgeschwindigkeit des menschlichen Auges. Zeitschrift für rationelle Medicin 1861, 3. Reihe, XI. p. 300. — Pope, Beiträge zur Optik des Auges: 1) das Farbenspectrum als Mittel zur Messung der Accommodation und der chromatischen Abweichung. 2) Eine neue Art der Asymmetrie des Auges. 3) Erklärung des Entstehens der Irradiation. Arch. f. Ophth. 1863, IX. 1, p. 41. — Witter, Ueber den Grund der accommodatorischen Formveränderung der Linse. Arch. f. Ophth. 1863, IX. 1, p. 207. — Heiberg, Zur Anatomie und Physiologie der *Zonula Zinnii*. Arch. f. Ophth. 1865, XI. 3, p. 168. — Trautvetter, Ueber den Nerv der Accommodation. Archiv für Ophth. 1866, XII. 1, p. 95. — Coccius, Der Mechanismus der Accommodation des menschlichen Auges. Leipzig 1868. — Hensen und Völckers, Experimentaluntersuchung über den Mechanismus der Accommodation. Kiel 1868. — F. E. Schulze, Der Ciliarmuskel des Menschen. Arch. f. mikroscop. Anat. 1867, III. p. 477. — W. v. Bezold, Versuche über Zerstreuungsbilder. Archiv f. Ophthalm. 1868, XIV. 2, p. 1. Poggendorff's Annalen. 1869, Bd. 138, p. 554. —— Ueber objective Darstellung von Zerstreuungsbildern. Ibid. 1869, XV. 3, p. 281. — Woinow, Zur Frage über die Accommodation. Arch. f. Ophth. 1869, XV. 2, p. 167. — Adamük und Woinow, Zur Frage über die Accommodation der Presbyopen. Arch. f. Ophth. 1870. XVI. 1, p. 144. — Knapp, Ueber den Einfluss der Brillen auf die optischen Constanten und die Sehschärfe des Auges. Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde 1870, Bd I. 2, p. 152. — Schneller, Beiträge zur Lehre von der Accommodation und Refraction. Arch. f. Ophth. 1870, XVI. 1, p. 176. — Adamük, Bijdrage tot het mechanisme der accommodatie. Onderzoekingen in het Physiol. Laborat. te Utrecht 1870. Tweede Reeks III. p. 403. — Förster, Accommodationsvermögen bei Aphakie. Klinische Monatsbl. f. Augenheilk. X. 1872. Februarheft p. 39. — Donders, Ueber scheinbare Accommodation bei Aphakie. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 1, p. 56. — Woinow, Das Accommodationsvermögen bei Aphakie. A. f. Ophth. 1873, XIX. 3, p. 107. — Hensen und Völckers, Ueber die Accommodationsbewegung der Chorioidea im Auge des

Menschen, Affen und der Katze. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 1, p. 156. — Nagel, Ueber die Benutzung des Metermaasses zur Numerirung der Brillen. Klinische Monatsbl. für Augenheilkunde 1874. Decemberheft.

§ 16. Lambert, Photometria. Augustae Vindelicorum 1760. — E. H. Weber, Annotationes anatomicae et physiologicae III. Lipsiae 1851. 1) Tractatus de motu iridis (1821). 2) Summa doctrinae de motu iridis (1851). — Stampfer, Methode, den Durchmesser der Pupille sowohl bei Tage als bei Nacht am eigenen Auge zu messen. Wiener Akad.-Berichte 1852, Bd. VIII. p. 511. — Valentin, De functionibus nervorum cerebralium Libri IV. Bernae 1839. — Budge, Ueber die Bewegung der Iris. Braunschweig 1855. — Dubrunfaut, Note sur la vision. Compt. rend. 1855. T. 41, p. 1087. — Czermak, Ueber die Wirkung des Atropin auf die Iris. Wiener Akademie-Berichte 1860, Bd. 39, p. 526. — Fechner, Ueber einige Verhältnisse des binocularen Sehens. Leipzig 1860. Aus den Abhandlungen der Leipziger Akademie Bd. VII. p. 339—563. — v. Gräfe, Ueber Calabar-Bohne. Arch. f. Ophth. 1863, IX. 3, p. 87—128. — F. Arlt jun., Beitrag zur Kenntniss der Zeitverhältnisse bei den Bewegungen der Iris. Arch. f. Ophth. 1869, XV. 1, p. 294. — Adamük und Woinow, Ueber die Pupillenveränderung bei der Accommodation. A. f. Ophth. 1871, XVII. 1, p. 158. — Donders, Reflexie-beweging der beide pupillen, bij het invallen van licht aan éene zijde. (Separatabdruck.) — Grünhagen, Zur Irisbewegung. Pflüger's Archiv f. Physiologie 1870, III. p. 440.

§ 17—19. Czermak, Ueber die Wirkung punktförmiger Diaphragmen auf das Sehen. (Physiologische Studien p. 12.) Wiener Akademie-Berichte 1854, Bd. XII. p. 334 und 1855, XV. p. 431. — Volkmann, Theorie zur Berechnung der von mir gemessenen Zerstreuungskreise des Lichts bei fehlerhafter Accommodation des Auges. Poggendorff's Annalen 1838, Bd. 45, p. 193. — Plateau, Ueber Irradiation. Poggendorff's Annalen 1842. Ergänzungsband I. p. 79, p. 193 und p. 405. — Welker, Ueber Irradiation und einige andere Erscheinungen des Sehens. Giessen 1852. — Fliedner, Beobachtungen über Zerstreuungsbilder im Auge, sowie über die Theorie des Sehens. Poggendorff's Annalen 1852, Bd. 85, p. 321. — Sturm, Sur la théorie de la vision. Comptes rendus 1845, XX. p. 554, 761, 1238. Poggendorff's Annalen 1845, Bd. 65, p. 116 und p. 374. Brennlinie.) — H. Meyer in Leipzig, Ueber die sphärische Abweichung des menschlichen Auges. Poggendorff's Annalen 1853, Bd. 89, p. 540. —— Beugungserscheinungen im menschlichen Auge. Poggendorff's Annalen 1855, Bd. 96, p. 603. — F. Zöllner, Beiträge zur Kenntniss der chromatischen und monochromatischen Abweichungen des Auges. Poggendorff's Annalen 1860, Bd. 111, p. 329. — Donders, Beiträge zur Kenntniss der Refractions- und Accommodations-Anomalien. Archiv für Ophthalm. 1860, VI. 1, p. 62—106. VI. 2, p. 210. VII. 1, p. 155. —— Astigmatismus und cylindrische Gläser. Berlin 1862. —— Die Refractions-Anomalien des Auges und ihre Folgen: Poggendorff's Annalen 1862, Bd. 120, p. 452, woselbst die vollständige Zusammenstellung von Donders' Arbeiten hierüber bis 1862 gegeben ist. — Knapp, Ueber die Asymmetrie des Auges in seinen verschiedenen Meridiansystemen. Arch. f. Ophthalm. 1862, VIII. 2, p. 185—241. — Kaiser, Die Theorie des Astigmatismus. Arch. f. Ophth. 1865, XI. 3, p. 186. — Schirmer, Die Lehre von den Refractions- und Accommodations-Störungen des Auges. Berlin 1866. — Brücke, Ueber asymmetrische Strahlenbrechung im menschlichen Auge. Wiener Akademie-Berichte 1868, Bd. 58, II. p. 321. — Burchardt's Internationale Sehproben. 2. Auflage. Cassel 1871. — Hay in Boston), Ueber Knapp's allgemeine Formeln für astigmatische Strahlen und deren Specialanwendung auf das Auge. Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde II. 1, 1871, p. 187. — Mauthner, Vorlesungen über die optische Fehler des Auges. I. Abth. p. 1—72. Wien 1872. — Fraunhofer, Bestimmung des Brechungs- und des Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung astronomischer Fernröhre. Denkschriften der Bayrischen Akademie. München 1814 und 1815, Bd. V. p. 193. Gilbert's Annalen der Physik 1814, Bd. 56, p. 304. cf. Schu-

macher Abhandlungen 1823, Heft II. p. 39. (Beilage zu den astronom. Nachrichten.) — Tourtual, Die Chromasie des Auges. Meckel's Archiv 1830, T. V. p. 129. — A. Matthiessen (d'Altona), Détermination exacte de la dispersion de l'oeil humain par les mésures directes. Comptes rendus 1847. T. XXIV. p. 875. Deutsch in Poggendorff's Annalen 1847, Bd. 71, p. 578. — Czermak, Zur Chromasie des Auges. Wiener Akademie-Berichte 1855, Bd. XVII. p. 563. — A. Fick, Einige Versuche über die chromatische Abweichung des menschlichen Auges. Arch. f. Ophth. 1856, II. 2, p. 70.

§ 20—21. (Wegen der Literatur zu § 20 und § 21 verweisen wir auf die Literatur in Bd. III. 1 dieses Handbuches p. 180 und 181, ferner p. 169—173, und führen hier nur an): Brücke, Ueber das Leuchten der menschlichen Augen. Müller's Archiv 1847, p. 225 und p. 479. — Helmholtz, Beschreibung eines Augenspiegels zur Untersuchung der Netzhaut im lebenden Auge. 1851. —— Ueber einen neuen Augenspiegel. Vierordt's Archiv für physiol. Heilk. 1852. Ergänzungsheft. — Coccius, Glaucom, Entzündung und die Autopsie mit dem Augenspiegel. 1859. — Heymann, Die Autoscopie des Auges. Leipzig 1863.

II. Empfindung.

§ 22—23. (Allgemeines.)

Elliot, Observations on the Senses. 1780. Beobachtungen über die Sinne. Leipzig 1785. — Steinbuch, Beitrag zur Physiologie der Sinne. Nürnberg 1811. — Purkinje, Commentatio de examine physiologico Organi visus et Systematis cutanei (Habilitationsschrift zur ordentlichen Professur). Vratislaviae 1823. —— Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. I. Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht. Prag 1823. II. Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht. Berlin 1825. — J. Müller, Ueber die phantastischen Gesichtserscheinungen. Coblenz 1826. — Hiort, De Functione retinae. Diss. inaug. Christiania 1826. (Licht- und Farbenempfindung.) — Förster, Ueber Hemeralopie und die Anwendung eines Photometers im Gebiete der Ophthalmologie. (Habilitationsschrift.) Breslau 1857. — Fechner, Ueber ein wichtiges psychophysisches Gesetz. Abhandlungen der Königl. Sächs. Akad. zu Leipzig, Bd. IV. 1858, p. 457 und Nachtrag dazu in Berichte d. Akad. zu Leipzig 1859, p. 58. —— Elemente der Psychophysik. Leipzig 1860. 2 Bände. — Aubert, Beiträge zur Physiologie der Netzhaut. Abhandlungen der Schles. Ges. für vaterl. Cultur 1861, p. 49 und Moleschott's Untersuchungen VIII. p. 243. — Fechner, Ueber die Frage des psychophysischen Grundgesetzes mit Rücksicht auf Aubert's Versuche. Berichte der Sächs. Ges. d. Wissensch. Leipzig 1864, p. 1. — Aubert, Untersuchungen über die Sinnesthätigkeiten der Netzhaut. Poggendorff's Ann. 1862, Bd. 115, p. 87 und Bd. 116, p. 249. —— Ueber subjective Lichterscheinungen. Poggendorff's Annalen 1862, Bd. 117, p. 638. — Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung 1862. (Auch erschienen in Zeitschrift für ration. Medicin. 1858—1862.) — W. Wundt, Grundzüge der physiologischen Psychologie. Leipzig 1874. — Oppel, Ueber subjective Lichterscheinungen. Poggendorff's Annalen 1863, Bd. 118, p. 480. — Dastich, Ueber die neueren physiologisch-psychologischen Forschungen im Gebiete der menschlichen Sinne. Prag 1864. (Abhandlungen der Köngl. Böhm. Ges. d. Wiss. V. Folge, 13. Bd.) — Aubert, Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. — Hering, Zur Lehre vom Lichtsinne. Wiener Akademie-Berichte 1872, Bd. 66. 1874 Bd. 69: I. Ueber successive Lichtinduction, 1872, Juniheft. II. Ueber simultanen Lichtcontrast, 1873, Decemberheft. III. Ueber simultane Lichtinduction und über successiven Contrast, 1873, Decemberheft. IV. Ueber die sogenannte Intensität der Lichtempfindung und über die Empfindung des Schwarzen, 1874, Märzheft. V. Grundzüge einer Theorie des Lichtsinnes, 1874, Aprilheft. VI. Grundzüge einer Theorie des Farbensinnes 1874, Maiheft. — Talma, Over licht en kleurperceptie. Bijbladen 14de Verslag 1873. Nederl.

Gasthuis for ooglijders p. 129. — Plateau, Ueber die Messung psychischer Empfindungen und das Gesetz, welches die Stärke dieser Empfindungen mit der Stärke der erregenden Ursache verknüpft. Poggendorff's Annalen 1873, Bd. 150, p. 465 (aus Bullet. de l'Acad. de Belgique T. 33, p. 1772).

24—27. Littrow, Die Wunder des Himmels. Stuttgart 1837. — Talbot, Phil. Magazine Ser. III. Vol. V. p. 321 bei Plateau, Poggendorff's Annalen 1835, Bd. 35, p. 459 citirt. — Bouguer, Traité d'Optique sur la gradation de la lumière par Lacaille 1760; oder: Bougeri Optice de diversis luminis gradibus dimetiendis in Latinum conversum a J. Richtenburg. Viennae 1762. — Masson, Electro-photometrische Studien oder: Etudes de Photométrie électrique. Poggendorff's Annalen 1844, Bd. 63, p. 158 aus Compt. rend. T. XVIII. p. 289 und Annales de Chimie et de Physique 1845. 3me ser. T. XIV. p. 129. — Maxwell, Experiments on colour perceived by the eye with remarks on colour-blindness. Edinburgh Transactions 1855, Bd. 21, p. 275 und Edinburgh Journal 1855, I. p. 359. — J. Herschel, Vom Licht. Deutsch von Schmidt, Stuttgart 1831. — Klein, De l'influence de l'éclairage sur l'acuité visuelle. Paris 1873. Arago, Populäre Astronomie. Deutsch von Hankel 1855. Astronomie populaire T. I. Oeuvres T. X. — Ruete, Explicatio facti, quod minimae paullum lucentes stellae tantum peripheria retinae cerni possint. Programm. Leipzig 1859. — Hensen, Ueber das Sehen in der *Fovea centralis*. Virchow's Archiv f. path. Anat. 1867, Bd. 39, p. 475.

28—30. Fechner, Ueber die Contrastempfindung. Berichte der Leipziger Akademie 1860, p. 71. — L. Hermann, Eine Erscheinung simultanen Contrastes. Pflüger's Archiv für Physiologie Bd. III. 1870, p. 13. — Mach, Ueber die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut (I.) Wiener Akademie-Berichte 1865, Bd. 52, p. 303. (II.) ibid. 1866, Bd. 54, II. p. 131. (III.) ibid. p. 393. (IV.) ibid. 1868, Bd. 57, II. p. 11. —— Bemerkungen über intermittirende Lichtreize. Reichert und Dubois' Archiv 1865, p. 629. — Mach, Ueber die Abhängigkeit der Netzhautstellen von einander. Vierteljahrsschrift für Psychiatrie 1868. — Brewster, Das Stereoscop. Deutsch von Schmidt. Weimar 1862. — Valerius, Beschreibung eines Verfahrens zur Messung der Vorzüge des binocularen Sehens gegen das monoculare, in Betreff sowohl der Helligkeit als Deutlichkeit. Poggendorff's Annalen 1873, Bd. 150, p. 317 (aus den Bullet. de l'acad. de Bruxelles T. 34). — A. Fick, Ueber den zeitlichen Verlauf der Erregung in der Netzhaut. Reichert's und Dubois' Archiv 1863, p. 739. — Brücke, Ueber den Netzeffect intermittirender Netzhautreizungen. Wiener Akad.-Berichte 1864, Bd. 49, p. 128. — C. F. Müller, Versuche über den Verlauf der Netzhautermüdung. Inaug. Diss. Zürich 1866. — Exner, Ueber die zu einer Gesichtswahrnehmung nöthige Zeit. Wiener Akademie-Berichte 1868, Bd. 58, II, p. 601. — Baxt, Ueber die Zeit, welche nöthig ist, damit ein Gesichtseindruck zum Bewusstsein kommt und über die Grösse (Extension) der bewussten Wahrnehmung bei einem Gesichtseindrucke von gegebener Dauer. Pflüger's Archiv f. Physiologie 1871, IV. p. 325. — Troxler, Ueber das Verschwinden gegebener Gegenstände innerhalb unseres Gesichtskreises. Himly und Schmidt, Ophthalmol. Bibliothek 1802, II. p. 1. — Maxwell, On the unequal sensibility of the foramen centrale to light of different colours. Edinburgh Journ. 1856, IV. p. 337. — Brewster, Briefe über natürliche Magie an Walter Scott. Berlin 1835.

31—33. Peiresc, Vita Peirescii von Gassendi, Edit. tertia 1658, p. 175. — Plateau, Essai d'une Théorie générale comprenant l'ensemble des Apparences qui succèdent à la contemplation des Objets colorés etc. Annales de Chimie et de Physique 1835, Bd. 58, p. 337. Poggendorff's Annalen 1834, Bd. 32, p. 543. — Brücke, Untersuchung über subjective Farben. Poggendorff's Annalen 1851, Bd. 84, p. 418. — Emsmann, Ueber die Dauer des Lichteindrucks. Poggendorff's Annalen 1854, Bd. 91, p. 611. — Aubert, Ueber die durch den elektrischen Funken erzeugten Nachbilder. Moleschott's Unters. z. Naturlehre d. Menschen 1858, V. p. 280. — Dvořák, Versuche über die Nachbilder von Reizveränderungen. Wiener Akademie-Berichte 1870, Bd. 61, März. — Exner,

Bemerkungen über intermittirende Netzhautreizung. Pflüger's Archiv für Physiologie Bd. III. 1870, p. 214. —— Erregungsvorgang im Sehnervenapparate. Wiener Akademie-Berichte 1872, Bd. 65, Februarheft. — Fechner, Ueber die subjectiven Nach- und Nebenbilder. Poggendorff's Annalen 1840, Bd. 50, p. 193 u. p. 427. — Aubert, Ueber das Verhalten der Nachbilder auf den peripherischen Theilen der Netzhaut. Moleschott's Untersuchungen 1858, Bd. IV. p. 215. — Marangoni, Neue Methode, die Blendungsbilder im Auge zu entwickeln. Poggendorff's Annalen 1872, Bd. 146, p. 115. (Aus dem Nuovo Cimento 1870, Februar und März.) — d'Arcy, Sur la durée de la sensation de la vue. Mémoires de l'Acad. de Paris 1765, p. 450. — Talbot (citirt von Plateau). Philos. Magaz. Ser. III. 1834, Vol. V. p. 321. — Plateau, Betrachtungen über ein von Talbot vorgeschlagenes photometrisches Princip. Poggendorff's Annalen 1835, Bd. 35, p. 458 aus Bulletin de l'Acad. roy. de Bruxelles 1835, No. 2, p. 52 und No. 3, p. 89.

§ 34. Leonardo da Vinci, Trattato della Pittura 1519. Paris 1561. Mahlerey 1786, p. 114. — Lambert, Beschreibung einer mit dem Calauischen Wachse ausgemahlten Farbenpyramide. Berlin 1772. — Goethe, Zur Farbenlehre 1810. (In Goethe's Werken enthalten.) Geschichte der Farbenlehre (in Goethe's Werken). — Thomas Young, Bakerian Lecture, On the Theory of Light and Colours. Philosophical Transactions 1802, P. I. p. 12. — Plateau, Ueber einige Eigenschaften der vom Lichte auf das Gesichtsorgan hervorgebrachten Eindrücke. Poggendorff's Annalen 1830, Bd. 20, p. 304. — Brewster, Ueber Schwingungen in der Netzhaut, erregt durch die Wirkung leuchtender Punkte (Irradiation u. A.). Poggendorff's Annalen 1833, Bd. 27, p. 490, aus London and Edinburgh Phil. Magaz. Vol. I. p. 169. —— Beobachtungen über die Wirkung des Lichts auf die Netzhaut, nebst einer Untersuchung der von Smith beschriebenen Versuche. Poggendorff's Annalen 1838, Bd. 29, p. 339 aus Phil. Mag. Ser. III. Vol. II. p. 168. — Szokalsky, Ueber die Empfindungen der Farben in physiologischer und pathologischer Hinsicht. Giessen 1842. — Brewster, Bemerkungen über die Elementarfarben des Spectrums. Poggendorff's Annalen 1848, Bd. 75, p. 81, aus Philos. Magaz. Ser. III. T. 32, p. 489. — Unger, Ueber die Theorie der Farbenharmonie. Poggendorff's Ann. 1852, Bd. 87, p. 121. — Helmholtz, Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben. Poggendorff's Annalen 1852, Bd. 87, p. 45 und Müller's Archiv 1852, p. 461. —— Ueber Dr. Brewster's Analyse des Sonnenlichts. Poggendorff's Ann. 1852, Bd. 86, p. 501. — Helmholtz, Ueber die Zusammensetzung der Spectralfarben. Poggendorff's Annalen 1855, Bd. 94, p. 1. —— Ueber die Empfindlichkeit der menschlichen Netzhaut für die brechbarsten Strahlen des Sonnenlichtes. ibid. p. 205. — Grassmann, Zur Theorie der Farbenmischung. Poggendorff's Annalen 1853, Bd. 89, p. 69. — Dove, Darstellung der Farbenlehre und optische Studien. Berlin 1853. —— Optische Studien. Berlin 1859. — Donders, Ueber das Verhalten der unsichtbaren Lichtstrahlen von hoher Brechbarkeit in den Medien des Auges. Müller's Archiv 1853, p. 459. — Schopenhauer, Ueber das Sehen und die Farben. Leipzig 1854. — Gräf, Ueber den Einfluss der Farben auf die Beurtheilung der Grösse. Dissertation, Würzburg 1855. — Chevreul, Exposé d'un moyen de définir et nommer les couleurs, d'après une méthode précise et expérimentale, avec l'application de ce moyen à la définition et à la dénomination des couleurs d'un grand nombre de corps naturels et de produits artificiels. Mémoires de l'Academie des Sciences de L'institut impérial de France T. XXXIII. Paris 1861. — Dove, Ueber den Unterschied der auf der Palette des Malers entstehenden Mischfarben und der auf dem Farbenkreisel hervortretenden. Poggendorff's Annalen 1864, Bd. 121, p. 142. — Brücke, Die Physiologie der Farben für die Zwecke der Kunstgewerbe. Leipzig 1866. — Preyer, Ueber anomale Farbenempfindungen und die physiologischen Grundfarben. Pflüger's Archiv für Physiologie 1868, I. p. 299. — J. J. Müller, Zur Theorie der Farben. Poggendorff's Annalen 1870, Bd. 139, p. 411 u. p. 593, Arch. f. Ophthalm. 1869, XV. 2, p. 208. — J. K. Becker,

Zur Lehre von den subjectiven Farbenerscheinungen. Poggendorff's Annalen 1871. Ergänzungsband V. p. 305. — W. v. Bezold, Ueber das Gesetz der Farbenmischung und die physiologischen Grundfarben. Poggendorff's Annalen 1873, Bd. 150, p. 71 u. p. 221. — W. Schön, Zur Farbenempfindung. Berl. Klinische Wochenschrift 1874, No. 29. — J. Stilling, Beiträge zur Lehre von den Farbenempfindungen. Stuttgart 1875. (Ausserordentliches Beilageheft zu den klinischen Monatsblättern für Augenheilkunde. XIII. Jahrgang.)

§ 35. Lambert, Photometria, sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae. Augustae Vindelicorum 1760. — Musschenbroek, Introductio ad Philosophiam 1768. T. II. § 1820. — Der Farbenkreisel von Busolt. Poggendorff's Ann. 1834, Bd. 32, p. 656. — Challis, Theoretische Auslegung einiger Thatsachen, die Zusammensetzung der Farben des Spectrums betreffend. Poggendorff's Annalen 1836, Bd. 37, p. 528. — C. Völckers, Ueber Farbenmischung in beiden Augen. Müller's Archiv 1838, p. 60. — Volkmann, Ueber die Empfindung, welche entsteht, wenn verschiedenfarbige Lichtstrahlen auf identische Netzhautstellen fallen. Müller's Archiv 1838, p. 373. — Mile, Ueber die Empfindung, welche entsteht, wenn verschiedenfarbige Lichtstrahlen auf dieselben Stellen der Retina eines einzigen Auges fallen. Müller's Archiv 1839, p. 64. — Dove, Ueber die Darstellung des Weiss aus Complementärfarben und über die optischen Erscheinungen, welche in rotirenden Polarisationsapparaten sich zeigen. Poggendorff's Ann. 1847, Bd. 71, p. 97. —— Optische Notizen: 1) Vereinigung prismatischer Farben zu Weiss, 2) über subjective Farben durch elektrische Beleuchtung. Poggendorff's Annalen 1867, Bd. 131, p. 655. —— Ueber subjective Farbenerscheinungen bei einem Farbenkreisel und eine darauf gegründete Methode, seine Umdrehungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Poggendorff's Annalen 1847, Bd. 71, p. 112. — Plateau, Reclamation gegen Helmholtz über die Theorie der zusammengesetzten Farben etc. Poggendorff's Ann. 1853, Bd. 88, p. 172. (Moigno's Kosmos II. p. 241.) — Czermak, Eine Modification des Scheiner'schen Versuches. (Physiologische Studien p. 43.) Wiener Akademie-Berichte 1854, Bd. XII. p. 367 und 1855 XV. p. 457. — Maxwell, Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness. Transactions of the Roy. Society of Edinburgh. Vol. XXI. 1855, p. 275. —— On the theory of compound colours and the Relations of the colours of the spectrum. Philos. Transactions 1860, T. 150, P. I. p. 57.

§ 37—40. Stokes, On the change of Refrangibility of Light. Philosoph. Transactions 1852, p. 463. — Dove, Ueber den Einfluss der Helligkeit einer weissen Beleuchtung auf die relative Intensität verschiedener Farben. Poggendorff's Annalen 1852, Bd. 85, p. 397. — Bohn, Ueber das Farbensehen und die Theorie der Mischfarben. Poggendorff's Annalen 1865, Bd. 125, p. 87. — Mandelstamm, Beitrag zur Physiologie der Farben. A. f. Ophth. 1867, XIII. 2, p. 399. — Vierordt, Beschreibung einer photometrischen Methode zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes. Poggendorff's Annalen 1869, Bd. 137, p. 200. —— Die Messung der Lichtabsorption durchsichtiger Medien mittelst des Spectralapparates. Poggendorff's Ann. 1870, Bd. 140, p. 172. —— Die Anwendung des Spectralapparates zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes. Tübingen 1871. — Woinow, Zur Frage über die Intensität der Farbenempfindungen. Arch. f. Ophth. 1870, XVI. 1, p. 251. — Lamansky, Ueber die Grenzen der Empfindlichkeit des Auges für Spectralfarben. Archiv f. Ophthalm. 1870, XVII. 1, p. 123. Poggendorff's Ann. 1871, Bd. 143, p. 633. — Dobrowolsky, Ueber Empfindlichkeit des Auges gegen verschiedene Spectralfarben. Arch. f. Ophth. 1872. XVIII. 1, p. 66. —— Ueber die Empfindlichkeit des Auges gegen die Lichtintensität verschiedener Spectralfarben. Arch. f. Ophth. 1872, XVIII. 1, p. 74. —— Ueber gleichmässige Ab- und Zunahme der Lichtintensität verschiedener Spectralfarben bei gleichmässiger Ab- und Zunahme der Lichtstärke des Gesammtlichtes. Arch. f. Ophth. 1872, XVIII. 1, p. 92. —— Zur Kenntniss über die Empfindlichkeit des Auges gegen Farben-

töne. Arch. f. Ophth. 1872, XVIII. 1, p. 98. — Bohn, Photometrische Untersuchungen (Helligkeit der Farben, Unterschiedsempfindlichkeit, Grenzen der Farbenempfindung u. A.). Poggendorff's Annalen 1874, Ergänzungsband VI. p. 386. — Grailich, Beitrag zur Theorie der gemischten Farben. Wiener Akademie-Berichte 1854, Bd. 13, p. 201. — Vierordt, Das Pendel als Messapparat der Dauer der Gesichtseindrücke und Burckhardt und Faber, Versuche über die zu einer Farbenempfindung erforderliche kleinste Zeit in Pflüger's Archiv für Physiologie Bd. II. 1869, p. 121 und 127.

§ 41—42. Struve, Mensurae micrometricae stellarum compositarum. Petropoli 1837, p. LXXV. — v. Wittich, Ueber die geringsten Ausdehnungen, welche man farbigen Objecten geben kann, um sie noch in ihrer specifischen Farbe wahrzunehmen. Königsberger medicin. Jahrbücher 1864, Bd. IV. p. 23. — Zöllner, Ueber Farbenbestimmung der Gestirne. Poggendorff's Annalen 1868, Bd. 135, p. 59. — Lichtenberger, Observationes quaedam de spectris objectorum extra fines visus distincti positorum. Diss. inaug. Leipzig 1839. — Aubert, Ueber die Grenzen der Farbenwahrnehmung auf den seitlichen Theilen der Netzhaut. Arch. f. Ophth. 1857, III. 2, p. 38. — Schelske, Zur Farbenempfindung. 1) Ueber Farbenblindheit des normalen Auges. 2) Ueber den Einfluss constanter elektrischer Ströme auf die Farbenempfindung des Auges. Arch. f. Ophth. 1863, IX. 3, p. 39—49 und p. 49—62. — Möser, Das Perimeter und seine Anwendung. Inaug. Diss. Breslau 1869. — Woinow, Zur Farbenempfindung. Arch. f. Ophth. 1870, XVI. 1, p. 212. — Landolt, Il Perimetro e la sua applicazione. Annali d'Ottalmologia. Milano 1871, p. 1. —— De la perception des couleurs à la periphérie de la rétine. Annales d'Oculistique 1874, p. 1. — W. Schön, Die Lehre vom Gesichtsfelde und seinen Anomalien. Berlin 1874. — Woinow, Beiträge zur Farbenlehre. A. f. O. 1875, XXI. 1, p. 223. — Klug, Ueber Farbenempfindung bei indirectem Sehen. A. f. O. 1875, XXI. 1, p. 251.

§ 43. Otto von Guericke, Experimenta nova Magdeburgica. 1672, p. 142. — Prieur de la Cote d'Or, Extrait d'un mémoire ayant pour titre: Considérations sur les couleurs et sur plusieurs de leurs apparences singulières, lu le 13 ventose an 13. Annales de Chimie 1805, T. 54, p. 1. Gilbert's Ann. d. Physik Bd. 21, 1806 p. 315. — Chevreul, Mémoire sur l'influence que deux couleurs peuvent avoir l'une sur l'autre, quand on les voit simultanément. (1828.) Mémoires de l'Institut 1832, p. 447. —— Die Farbenharmonie. Stuttgart 1840. — Smith, Versuche in Phil. Magaz. Ser. III. Vol. I. p. 249 bis 343, im Auszuge in Poggendorff's Ann. 1833, Bd. 29, p. 340. — Osann, Beschreibung einer einfachen Vorrichtung zur Hervorbringung sogenannter complementärer Farben und Nachweisung, dass die hiermit hervorgebrachten Farben objectiver Natur sind. Poggendorff's Ann. 1833, Bd. 27, p. 694. —— Ueber Ergänzungsfarben. Poggendorff's Ann. 1836, Bd. 37, p. 287. —— Nachträgliche Bemerkungen zu meinem Aufsatz über Ergänzungsfarben. Poggendorff's Ann. 1837, Bd. 42, p. 72. — Fechner, Ueber die Frage, ob die sogenannten Farben durch den Contrast objectiver Natur seien. Poggendorff's Ann. 1838, Bd. 44, p. 221 und 513. — Dove, Ueber subjective Complementärfarben. Poggendorff's Annalen 1838, Bd. 45, p. 158. — Graf Schaffgotsch, Ueber einige Apparate für subjective Farbenerscheinungen. Poggendorff's Ann. 1841, Bd. 54, p. 193. — Grüel, Ueber einen Apparat für die subjectiven Farbenerscheinungen. — Dove, Ueber Scheiben zur Darstellung subjectiver Farben. Poggendorff's Ann. 1848, Bd. 75, p. 524, bezw. 526. — Sinsteden, Ueber einen neuen Farbenkreisel zur Darstellung subjectiver Complementärfarben und eine eigenthümliche Erscheinung, welche die Orangefarbe dabei zeigt. Poggendorff's Annalen 1851, Bd. 84, p. 45. — Hermann Meyer (in Leipzig), Ueber Contrast- und Complementärfarben. Poggendorff's Annalen 1855, Bd. 95, p. 170. — Oppel, Ueber farbige Schatten, bewirkt durch weisses Licht. Jahresbericht des physik. Vereins zu Frankfurt a. M. 1859—60, p. 65. — F. Zöllner, Ueber eine neue Beziehung der Retina zu den Bewegungen der Iris (seitlicher Fensterversuch). Poggendorff's Ann. 1860, Bd. 111, p. 481 u. 660. — F. Burckhardt, Ueber

Contrastfarben. Poggendorff's Annalen 1863, Bd. 118, p. 303. — Brücke, Ueber Ergänzungs- und Contrastfarben. Wiener Akademie-Berichte 1865, Bd. 51, Aprilheft. — Rollett, Zur Physiologie der Contrastfarben. Wiener Akademie-Berichte 1867, Bd. 55, Februarheft, Märzheft u. Maiheft. — Dove, Ueber die subjectiven Farben an den Doppelbildern farbiger Glasplatten. Poggendorff's Ann. 1871, Bd. 143, p. 491. Berl. Akademie-Berichte 1871, April.

§ 44. Dove, Ueber das Binocularsehen prismatischer Farben und eine neue stereoscopische Methode. Poggendorff's Ann. 1850, Bd. 80, p. 446. —— Ueber die Ursachen des Glanzes und der Irradiation, abgeleitet aus chromatischen Versuchen mit dem Stereoscop. —— Beschreibung neuer Stereoscope, Prismenstereoscop etc. Poggendorff's Annalen 1851, Bd. 83, p. 169, ibid. p. 183. — Brücke, Ueber die Wirkung complementär gefärbter Gläser beim binocularen Sehen. Poggendorff's Ann. 1853, Bd. 90, p. 606 und Wiener Akademie-Berichte 1853, Juni. — Dove, Ueber Binocularsehen durch verschieden gefärbte Gläser. Poggendorff's Ann. 1857, Bd. 101, p. 147. — Oppel, Bemerkungen zur Stereoscopie, insbesondere zur Erklärung des Glanzes zweifarbiger Bilder. Poggendorff's Ann. 1857, Bd. 100, p. 462. — Panum, Physiologische Untersuchungen über das Sehen mit zwei Augen. Kiel 1858. — Brücke, Ueber den Metallglanz. Wiener Akad.-Ber. 1861, Bd. 43, Januarheft. — Dove, Ueber Binocularsehen und subjective Farben. Poggendorff's Ann. 1861, Bd. 114, p. 163. Berl. Akad.-Ber. 1861, Mai. — Wundt, Ueber die Entstehung des Glanzes. Poggendorff's Annalen 1862, Bd. 116, p. 627. — Woinow, Ueber den Wettstreit der Sehfelder. Arch. f. Ophth. 1870, XVI. 1, p. 194. — W. v. Bezold, Ueber binoculare Farbenmischung. Poggendorff's Ann. 1874, Jubelband p. 585. — Dobrowolsky, Ueber binoculare Farbenmischung. Pflüger's Archiv 1875, X. p. 56.

§ 45—46. Plateau, Ueber einige Eigenschaften der vom Lichte auf das Gesichtsorgan hervorgebrachten Eindrücke. Poggendorff's Ann. 1830, Bd. 20, p. 304 (Bd. 96 der ganzen Folge der Annalen der Physik). Uebersetzung der Dissertation sur quelques propriétés des impressions produites par la lumière etc. par J. Plateau de Bruxelles. Liège 1829. — Laborde, Dauer der Lichteindrücke (für verschiedene Farben). Comptes rend. T. 63, p. 87, Poggendorff's Ann. 1866, Bd. 129, p. 660. — Kunkel, Ueber die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Zeit. Pflüger's Archiv f. Physiologie 1874, IX. p. 197. — Maria Bokowa, Ein Verfahren, künstliche Farbenblindheit hervorzubringen. Zeitschrift für ration. Med. 1863, III. Reihe, Bd. 17, p. 161. — Schön, Einfluss der Ermüdung auf die Farbenempfindung. Arch. f. Ophth. 1874, XX. 2, p. 273. — Buffon, Sur les couleurs accidentelles. Histoire de l'Acad. de Paris 1743, p. 215. — Aepinus, Observationes quaedam ad opticam pertinentes. I. De coloribus accidentalibus. Novi Commentarii Acad. scient. Petropolit. X. 1764, p. 282. — Scherffer, Abhandlung von den zufälligen Farben. Wien 1765. — Plateau, Essai d'une Théorie générale comprenant l'Ensemble des Apparences, qui succèdent à la contemplation des objets colorés. Annales de Chimie et de Physique 1835, T. 58, p. 337. — Fechner, Ueber die subjectiven Complementärfarben. Poggendorff's Ann. 1838, Bd. 44, p. 221 u. p. 513. —— Ueber eine Scheibe zur Erzeugung subjectiver Farben. Poggendorff's Ann. 1838, Bd. 45, p. 227. — Splittgerber, Methode, subjective und complementäre Farbenerscheinungen zu erregen. Poggendorff's Annalen 1840, Bd. 49, p. 587. — Knochenhauer, Ueber Blendungsbilder. Poggendorff's Ann. 1841, Bd. 53, p. 346. — Pickford, Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht. Heidelberg 1842. (Nachbilder.) — Brewster, Ueber die Combination verlängerter directer Lichteindrücke auf die Netzhaut mit deren complementären Eindrücken. Poggendorff's Ann. 1844, Bd. 61, p. 138 und Phil. Magaz. Ser. III. Vol. XXII. p. 434. — Plateau, Notizen über neue sonderbare Anwendungen des Verweilens der Eindrücke auf der Netzhaut. I. Poggendorff's Ann. 1849, Bd. 78, p. 563. II. ibid. Bd. 79, p. 269. III. ibid. 1850, Bd. 80, p. 150. IV. ibid. p. 287. — Melsens, Recherches sur la persistance des im-

pressions de la retine. 1858. Extrait des Bullet. de l'Acad. roy. de Belgique 2me Ser. T. III. No. 11. — Séguin, Note sur les couleurs accidentelles. Compt. rendus 1858, T. 47, p. 200. — F. Burckhardt, Die Contrastfarben im Nachbilde. Poggendorff's Ann. 1866, Bd. 129, p. 529. — Adamük und Woinow, Beiträge zur Lehre von den negativen Nachbildern. Arch. f. Ophth. 1871, XVII. 1, p. 135. — Dvořák, Ueber Analoga der persönlichen Differenz zwischen beiden Augen und den Netzhautstellen desselben Auges. Wiener Akad.-Ber. 1872, 8. März. — Plateau, Sur les couleurs accidentelles ou subjectives. Extrait des Bulletins de l'Acad. roy. de Belgique 2me Ser. T. 39, No. 1. Janvier 1875. Bruxelles 1875.

§ 47. Seebeck, Ueber den bei manchen Personen vorkommenden Mangel an Farbensinn. Poggendorff's Annalen 1837, Bd. 42, p. 177. (Enthält die früheren Publicationen über Farbenblindheit ziemlich vollständig.) — Dalton, Memoirs of Lit. and Phil. Soc. of Manchester. Vol. V. 1831. Edinburgh. Journal of Science 1831. No. IX. July, p. 97. Edinburgh. Philos. Journal Vol. VI. — Oppel, Einige Beobachtungen und Versuche über partielle Farbenblindheit. Jahresbericht des physik. Vereins zu Frankfurt am Main 1859—1860, p. 70 und ibid. 1860—61, p. 42. — E. Rose, Ueber stehende Farbentäuschungen. Arch. f. Ophth. 1860, VII. 2, p. 72. — F. Burckhardt, Notiz, betreffend mangelnden Farbensinn. Poggendorff's Ann. 1865, Bd. 124, p. 343. — Leber, Ueber das Vorkommen von Anomalien des Farbensinnes bei Krankheiten des Auges. Arch. f. Ophth. 1869, XV. 3, p. 26. — Woinow, Zur Diagnose der Farbenblindheit. Arch. f. Ophth. 1871, XVII. 2, p. 241. — Briesewitz, Ueber das Farbensehen bei normalem und atrophischem *Nervus opticus*. Inaug. Diss. Greifswald 1872. — Dor, Ueber Farbenblindheit. Einwendungen gegen die Young-Helmholtz'sche Theorie. Sitzungsberichte der Berner naturforschenden Gesellschaft 1872. — Schirmer, Ueber erworbene und angeborene Anomalien des Farbensinnes. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 2, p. 194. (Im Auszuge in Klinische Wochenschrift, Berlin 1873, No. 5.) — Hochecker, Ueber angeborene Farbenblindheit. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 3, p. 1. — Raehlmann, Beiträge zur Lehre vom Daltonismus und seiner Bedeutung für die Young'sche Farbentheorie. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 3, p. 88. — Fick, Zur Theorie der Farbenblindheit. Verhandlungen der Physik.-Med. Ges. zu Würzburg 1873. N. F. V. p. 129. — W. Schön, Ueber die Grenzen der Farbenempfindungen in pathologischen Fällen. Klin. Monatsblätter für Augenheilkunde 1873, p. 171. — Leber, Ueber die Theorie der Farbenblindheit und über die Art und Weise, wie gewisse, der Untersuchung von Farbenblinden entnommene Einwände gegen die Young-Helmholtz'sche Theorie sich mit derselben vereinigen lassen. Sitzungsberichte der Ophthalmologischen Gesellschaft in Klinische Monatsblätter 1873, p. 467. — Treitel, Ueber das Verhalten der peripheren und centralen Farbenperception bei *atrophia nervi optici*. Inaug. Diss. Königsberg 1875. — Raehlmann, Ueber den Farbensinn bei Sehnervenerkrankungen. A. f. O. 1875, XXI. 2, p. 27. — Martini, Mémoire sur la coloration de la vue par l'action de la Santonine. Comptes rend. 1858, T. 47, p. 259. — Rose, Ueber die Farbenblindheit durch Genuss der Santonsäure. Virchow's Arch. 1860, XIX. p. 522. XX. p. 245. 1863. XXVIII. p. 30. — M. Schultze, Ueber den gelben Fleck der Retina, seinen Einfluss auf normales Sehen und auf Farbenblindheit. Bonn 1866. (Vortrag in der med. Section der niederrhein. Ges. für Nat. u. Heilk. zu Bonn, Mai 1866.) — Hüfner, Versuch einer Erklärung der im Santonrausche beobachteten Erscheinung von partieller Farbenblindheit im Sinne der Young'schen Theorie. Archiv f. Ophthalm. 1867. XIII. 2, p. 309. — W. Schön, Zur Farbenempfindung. II. Farbenstörung durch Santonin. Berl. Klinische Wochenschrift 1874, No. 29. — Niemetschek, Ueber Farbenblindheit und Farbensehen. Prager Vierteljahrschrift 1868, Bd. 100, p. 224.

§ 48—50. Serre (d'Uzès), Essai sur les Phosphènes. Paris 1853. — Czermak, Physiologische Studien. Abdruck aus den Wiener Akademie-Berichten 1854, Bd. XII. p. 364 1855, Bd. XV. p. 454. —— Ueber das Accommodationsphosphen. Wiener Akademie-

Berichte 1857, Bd. XXVII. p. 78 und Archiv f. Ophthalmologie 1860, VII. 1, p. 147. — Vierordt, Physiologische Mittheilungen. (Chorioidealgefässe.) Archiv für physiol. Heilkunde 1856, p. 567. — Laiblin (Vierordt), Die Wahrnehmung der Chorioidealgefässe des eignen Auges. Inaug. Diss. Tübingen 1856. — Pope, Entoptische Erscheinungen im Zusammenhang mit dem Blutlauf. Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde 1869, Bd. I. 1, p. 72. —— Beiträge zur physiologischen Optik (entoptische Gefässerscheinungen) ibid. I. 2, 1870, p. 197. — Heuse, Ueber die Beobachtung einer neuen entoptischen Erscheinung. Arch. f. Ophth. 1872, XVIII. 2, p. 236. — Reich, Ueber einige subjective Erscheinungen bei gesteigertem intraocularen Druck. Klin. Monatsblätter 1874, p. 238. 1) Entoptische Pulsation, 2) Farbenempfindung. — Le Roy, Mémoires de Mathématique et de Physique de l'Academ. de France 1755, p. 86. — Ritter, Beiträge zur näheren Kenntniss des Galvanismus. Bd. II. p. 159. —— Wirkung des Galvanismus der Voltaischen Batterie auf menschliche Sinneswerkzeuge. Gilbert's Ann. d. Physik 1801, VII. p. 447. —— Von der Wirkung grösserer Voltaischer Säulen auf die Sinnesorgane, besonders auf das Auge u. s. w. Ibid. 1805, XIX. p. 1. — Brunner, Ein Beitrag zur elektrischen Reizung des *nervus opticus*. Leipzig 1863. — Rosenthal, Einwirkung des elektrischen Stromes auf die Centren der Sinnesorgane und die Haut. Allgem. Wiener Med. Zeitung 1872, No. 27 u. 28. — Schliephake, Beiträge zur Kenntniss der Einwirkung des galvanischen Stromes auf das menschliche Auge. Pflüger's Arch. f. Physiologie 1874, VIII. p. 565. — Haidinger, Ueber das directe Erkennen des polarisirten Lichts und der Lage der Polarisationsebene. Poggendorff's Annalen 1844, Bd. 63, p. 29. —— Beobachtung der Lichtpolarisationsbüschel in geradlinig polarisirtem Lichte. Poggendorff's Ann. 1846, Bd. 67, p. 435, Bd. 68, p. 73 u. p. 305. —— Helle Andreaskreuzlinien in der Sehaxe. Poggendorff's Annalen 1847, Bd. 70, p. 403. —— Das Interferenz-Schachbrettmuster und die Farbe der Polarisationsbüschel. Poggendorff's Ann. 1852, Bd. 85, p. 350. —— Die Loewe'schen Ringe, eine Beugungserscheinung. Poggendorff's Ann. 1852, Bd. 88, p. 451. —— Beitrag zur Erklärung der Farben der Polarisationsbüschel durch Beugung. Poggendorff's Annalen 1854, Bd. 91, p. 591. — Brewster, Ueber die Haidinger'schen Farbenbüschel. Poggendorff's Ann. 1859, Bd. 107, p. 346. — Burow, Der gelbe Fleck, im eignen Auge sichtbar. Müller's Archiv 1854, p. 166. — H. Meyer, Ueber den die Flamme eines Lichtes umgebenden Hof, so wie Beiträge zu »Unempfindlichkeit der Netzhaut in der Nähe starker Lichteindrücke«, »Mondhöfe«, »Loewe'sche Ringe« etc. Poggendorff's Ann. 1855, Bd. 96, p. 235. — van der Willigen, Eine Lichterscheinung im Auge. Poggendorff's Ann. 1857, Bd. 102, p. 147. — Heinrich Müller, Ueber eine von van Willigen erwähnte Lichterscheinung im Auge. Würzburger Verhandlungen 1859, Bd. IX. p. XXX. — Maxwell, On the unequal sensibility of the foramen centrale to light of different colours. Edinburgh Journal 1856, IV. p. 337. — Czermak, Die entoptische Wahrnehmung der Stäbchen- und Zapfenschicht. Wiener Akad.-Ber. 1860, Bd. 41, p. 645. —— Zur objectiven Erklärung einiger sogenannten subjectiven Gesichtserscheinungen. Wiener Akad.-Ber. 1861, Bd. 43, 2, p. 163. — Exner, Ueber einige neue subjective Gesichtserscheinungen. Pflüger's Archiv f. Physiol. 1868, I. p. 375 u. 1870, III. p. 233.

III. Wahrnehmung.

§ 51. (Allgemeines.)

Berkeley, An Essay towards a new theory of Vision (1709). In the Works of G. Berkeley edited by Fraser, Oxford 1871. Vol. I. p. 35. — Immanuel Kant, Kritik der reinen Vernunft. Siebente Auflage. Leipzig 1828. — Lotze, Medicinische Psychologie. Leipzig 1852. — Abbott, Sight and Touch: an attempt to disprove the received (or Berkeleian) Theory of Vision. London 1864. — Böhmer, Die Sinneswahrnehmung in ihren physiologischen und psychologischen Gesetzen. Erlangen 1864—1868. — Stumpf, Ueber den psychologischen Ursprung der Raumvorstellung. Leipzig 1873.

§ 52—57. Tobias Mayer, Experimenta circa visus aciem. Commentarii Soc. Götting. 1754, p. 97—112. — Hueck, Ueber die Grenzen des Sehvermögens. Müller's Archiv 1840, p. 82. — Bergmann, Zur Kenntniss des gelben Flecks der Netzhaut. Zeitschrift für rat. Medic. 1854. Neue Folge V. p. 245. — Heinrich Müller, Bemerkungen über die Zapfen am gelben Fleck des Menschen. Würzburger Naturwissensch. Zeitschrift 1861, II. p. 218. — Volkmann, Physiologische Untersuchungen im Gebiete der Optik. Erstes Heft. Leipzig 1863. Zweites Heft 1864. — M. Schultze, Zur Anatomie und Physiologie der Retina. Arch. f. mikroscop. Anat. 1866, II. p. 175. —— Neue Beiträge zur Anat. und Physiol. d. Retina des Menschen. Arch. f. mikroscop. Anat. 1871, VII. p. 244. —— Ueber Stäbchen und Zapfen der Retina. Arch. f. mikroscop. Anat. 1867, III. p. 215. —— Ueber die Nervenendigung in der Netzhaut des Auges bei Menschen und bei Thieren. (Aus den Sitzungsberichten der Niederrhein. Ges. f. Nat. und Heilk. zu Bonn, 3. Mai 1869.) — Harting, Ueber die neueren Linsensysteme von Merz und von Hartnack und über die Grenzen des optischen Vermögens bei unseren heutigen Mikroscopen. Poggendorff's Ann. 1861, Bd. 114, p. 82. —— Das Mikroscop. Deutsch von W. Theile. Braunschweig 1866, 3 Bde. — Volkmann, Ueber Irradiation. Berichte der Leipziger Gesellschaft der Wissenschaften 1857, p. 129. —— Ueber den Einfluss der Uebung auf das Erkennen räumlicher Distanzen. Berichte der Leipziger Gesellsch. d. Wissenschaften 1858, p. 38. —— Ueber das Vermögen, Grössenverhältnisse zu schätzen, ibid. p. 173. —— Weitere Untersuchungen über die Frage, ob die Zapfen der Netzhaut als Raumelemente beim Sehen fungiren. Reichert's und Dubois' Archiv 1866, p. 649. — Vierordt, Ueber die Messungen der Sehschärfe. A. f. O. 1863, IX. 1, p. 161, IX. 3, p. 219. — Hensen, Ueber eine Einrichtung der *Fovea centralis retinae*, welche bezweckt, dass feinere Distanzen, als solche, die dem Durchmesser eines Zapfens entsprechen, noch unterschieden werden können. Virchow's Archiv 1865, Bd. 34, p. 401. —— Ueber das Sehen in der *Fovea centralis*. Virchow's Archiv 1867, Bd. 39, p. 475. — Gerling, Ueber die Beobachtung von Netzhautbildern (am ausgeschnittenen Auge). Poggendorff's Ann. 1839, Bd. 46, p. 243. — E. H. Weber, Der Tastsinn und das Gemeingefühl. Handwörterbuch der Physiologie 1846, III. 2, p. 481. —— Ueber den Raumsinn und die Empfindungskreise in der Haut und im Auge. Berichte der Leipziger Gesellschaft der Wissenschaften 1852, p. 85. — Aubert und Förster, Beiträge zur Kenntniss des indirecten Sehens. Untersuchungen über den Raumsinn der Netzhaut. Arch. f. Ophthalm. 1857, III. 2, p. 1. — Aubert, Beiträge zur Kenntniss des indirecten Sehens. Moleschott's Unters. z. Naturl. d. Menschen 1857, IV. p. 16. — Landolt en Nuël, Proeven ter bepaling van het knooppunt voor excentrisch in het oog vallende Lichtstrahlen. Onderzoekingen in het Physiol. Laborator. te Utrecht 1874, Derde Reeks III. 1, p. 1. — Landolt und Nuël, Versuch einer Bestimmung des Knotenpunktes für excentrisch in das Auge fallende Lichtstrahlen. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 3, p. 301. — Förster, Mensurations du champ visuel monoculaire. Annales d'Oculistique 1868, p. 5. —— Das Perimeter. Klinische Monatsblätter f. Augenheilk. 1869, p. 411. (cf. Snellen und Landolt dieses Handbuch III. 1, p. 58 u. 71.) — Mariotte, Nouvelles découvertes sur la vue. Mémoires de l'Acad. de Paris 1669 und 1682. Philosophical Transactions 1668. Oeuvres 1740, p. 496. — Daniel Bernoulli, Experimentum circa nervum opticum. Comment. Acad. Petropolitanae T. I. 1728, p. 314. (Blinder Fleck.) — A. Fick und Paul Dubois-Reymond, Ueber die unempfindliche Stelle der Netzhaut im menschlichen Auge. Müller's Archiv 1853, p. 396. — Gudden, Ueber das Verhältniss der Centralgefässe des Auges zum Gesichtsfelde. Müller's Archiv 1849, p. 522. — Hannover, Das Auge, Beiträge zur Anatomie, Physiologie und Pathologie dieses Organs. Leipzig 1852. — Volkmann, Ueber einige Gesichtsphänomene, welche mit dem Vorhandensein eines unempfindlichen Flecks im Auge zusammenhängen. Berichte der Leipziger Gesellsch. d. Wissensch. 1853, p. 27. — v. Wittich, Studien über den blinden Fleck. Arch. f. Ophth. 1863, IX. 3, p. 1. — Zehender, Historische Notiz zur

Lehre vom blinden Fleck. Arch. f. Ophth. 1864, X. 1, p. 152. — Woinow, Ueber das Sehen mit dem blinden Fleck und seiner Umgebung. Arch. f. Ophth. 1869, XV. 2, p. 155. — Landolt, La Distanza diretta tra la macula lutea e la papilla del Nervo ottico. Giornale d'ottalmologia del Pr. Quaglino 1872, II. 1, p. 1. — De la Hire, Mémoire sur les differens accidens de la vue in Mém. de l'Acad. 1694 und Explication de quelques faits d'Optique in Mém. de l'Acad. 1709, p. 95. — Treviranus, Beiträge zur Aufklärung der Gesetze und Erscheinungen des organischen Lebens 1835, II. p. 42. — Brücke, Ueber die physiologische Bedeutung der stabförmigen Körper und der Zwillingszapfen in den Augen der Wirbelthiere. Müller's Archiv 1844, p. 444. — H. Müller, Ueber die entoptische Wahrnehmung der Netzhautgefässe, insbesondere als Beweismittel für die Lichtperception durch die nach hinten gelegenen Netzhautelemente. Würzburger Verhandlungen 1855, p. 411. — Heymann, Die empfindende Netzhautschicht. Dresden 1864. Aus den Verhandlungen der Leopoldin. Akad. 1863, Vol. XXX. — W. Zenker, Versuch einer Theorie der Farbenperception. Archiv für mikroscop. Anat. 1867, III. p. 249.

§ 58—61. Mile, Ueber die Richtungslinien des Sehens. Poggendorff's Ann. 1837, Bd. 42, p. 37. — Knochenhauer, Ueber die Richtungsstrahlen und Richtungslinien beim Sehen. Poggendorff's Ann. 1839, Bd. 46, p. 248. — Volkmann, Erklärung einiger Gesichtsphänomene (Localisation). Müller's Archiv 1839, p. 233. — Stamm, Ueber Volkmann's Richtungslinien des Sehens und über die Ursache der Undeutlichkeit ausserhalb der Augenaxe. Poggendorff's Ann. 1842, Bd. 57, p. 346. — L. Fick, Bemerkungen zur Physiologie des Sehens (Aufrechtsehen). Müller's Archiv 1854, p. 220. — Ueberweg, Zur Theorie der Richtung des Sehens. Zeitschrift für rationelle Medicin 1859, III. Reihe, Bd. V. p. 268. — Rollett, Ein unfehlbarer Beweis gegen die identischen Netzhautstellen. Wiener Med. Wochenschrift 1861, No. 37. — Nagel, Das Sehen mit zwei Augen und die Lehre von den identischen Netzhautstellen 1861. — Panum, Ueber die einheitliche Verschmelzung verschiedenartiger Netzhauteindrücke beim Sehen mit zwei Augen. Reichert's u. Dubois' Archiv 1861, p. 63. — Bahr, Ueber die Nichtexistenz identischer Netzhautstellen. A. f. Ophth. 1862, VIII. 2, p. 179. — v. Hasner, Ueber das Binocularsehen. (Räumlich.) Prag 1859. (Aus den Abhandlungen der Königl. Böhm. Gesellschaft der Wissenschaften. 5. Folge. 10. Band.) —— Beiträge zur Physiologie und Pathologie des Auges. Prag 1873. —— Zur Theorie der Sehempfindung. A. f. O. 1875, Bd. XXI. 1, p. 43. — Jacobson, Die Hasner'sche Theorie der Rückconstruction. Arch. f. Ophthalm. 1874, XX. 2, p. 71. — Classen, Ueber das Schlussverfahren des Sehactes. Rostock 1863. —— Durch welche Hülfsmittel orientiren wir uns über den Ort der gesehenen Dinge. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 3, p. 53. — Hering, Beiträge zur Physiologie. Leipzig 1861—1864. 1. Heft: Vom Ortssinne der Netzhaut, 1861. 2. Heft: Von den identischen Netzhautstellen, 1862. 3. Heft: Vom Horopter, 1863. 4. Heft: Auflösung des Horopterproblems, Augenbewegungen, 1864. 5. Heft: Vom binocularen Tiefsehen, Kritik einer Abhandlung von Helmholtz über den Horopter, 1864. —— Bemerkungen zu Volkmann's neuen Untersuchungen über das Binocularsehen. Dubois' u. Reichert's Archiv 1864, p. 303. —— Das Gesetz der identischen Sehrichtungen. Reichert's u. Dubois' Archiv 1864, p. 27. — Donders, Das binoculare Sehen und die Vorstellung von der dritten Dimension. Arch. f. Ophth. 1867, XIII. 1, p. 1. — Hering, Bemerkungen zu der Abhandlung von Donders über das binoculare Sehen. Arch. f. Ophth. 1868, XIV. 1, p. 1. — Kaiser, Der Modus des Binocularsehens. Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde 1869, Bd. I. 1, p. 180. — Woinow, Beiträge zur Lehre vom binocularen Sehen. Arch. f. Ophth. 1879, XVI. 1, p. 200. — Donders, De projectie der gezichtsverschijnselen naar de richtungslijnen. Onderzoekingen ged. in het Physiol. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool 1872, Derde Reeks I. p. 146. —— Die Projection der Gesichtserscheinungen nach den Richtungslinien. A. f. Ophth. 1871, XVII. 2, p. 1. —— De stereoskopische combinatie na operatie van scheelzien, en argu-

ment tegen de empiristische theorie. Onderzoekingen ged. in het Physiol. Laborator. d. Utrechtsche Hoogeschool 1872, Derde Reeks I. p. 83. — Hirschberg, Eine Beobachtungsreihe zur empiristischen Theorie des Sehens. A. f. O. 1875, Bd. XXI. 1, p. 23. — Volkmann, Ueber identische Netzhautstellen. Briefliche Mittheilung. Berliner Akad.-Ber. 1863. August. — W. v. Bezold, Ueber binoculares Sehen. Poggendorff's Ann. 1867, Bd. 130, p. 424. — Mandelstamm, Beitrag zur Lehre von der Lage correspondirender Netzhautpunkte. Arch. f. Ophth. 1872, XVIII. 2, p. 133. — Schöler, Zur Identitätsfrage: Grenzen der Correspondenz beider Sehfelder bei Betrachtung linearer, bezw. flächenhafter und körperlicher Objecte. Arch. f. Ophth. 1873, XIX. 1, p. 1. — van Moll, Over de normale incongruentie der Netvliezen. Onderzoekingeu gedaan in het Physiologisch Laboratorium der Utrechtsche Hoogeschool, 1875. Derde Reeks, III. p. 39.

§ 62. Prévost (Alexandre), Essai sur la théorie de la vision binoculaire. Genève 1843. —— Ueber die Theorie des Sehens mit zwei Augen. Poggendorff's Ann. 1844, Bd. 62, p. 548. — Emsmann, Ueber Doppeltsehen. Poggendorff's Ann. 1855, Bd. 96, p. 588. — Meissner, Beiträge zur Physiologie des Sehorgans. Leipzig 1854. (Horopter und Augenbewegungen.) — Claparède, Sur une nouvelle détermination de l'Horoptère. Comptes rendus 1858, p. 566. —— Beitrag zur Kenntniss des Horopters. Müller's Arch. 1859, p. 384. — Hankel, Mathematische Bestimmung des Horopters. Poggendorff's Ann. 1864, Bd. 122, p. 575. — Helmholtz, Bemerkungen über die Form des Horopters. Poggendorff's Ann. 1864, Bd. 123, p. 158. —— Ueber den Horopter. 1) Die Vertheilung der correspondirenden Punkte in beiden Sehfeldern. 2) Form des Horopters. 3) Bedeutung des Horopters beim Sehen. 4) Mathematische Berechnung der Form des Horopters. Arch f. Ophth. 1864, X. 1, p. 1—60. — Hering, Gegenbemerkungen über die Form des Horopters. Poggendorff's Ann. 1865, Bd. 124, p. 638. — Kaiser, Zur Lehre vom Horopter. Arch. f. Ophth. 1869, XV. 1, p. 75. — Wundt, Ueber binoculares Sehen. Poggendorff's Ann. 1862, Bd. 116, p. 617. — Hering, Ueber Wundt's Theorie des binocularen Sehens. Poggendorff's Ann. 1863, Bd. 119, p. 115. — Wundt, Ueber Dr. E. Hering's Kritik meiner Theorie des Binocularsehens. Poggendorff's Ann. 1863, Bd. 120, p. 172. — Hering, Zur Kritik der Wundt'schen Theorie des binocularen Sehens. Poggendorff's Ann. 1864, Bd. 122, p. 476. — Brewster, Ueber die Ursache der Farbenverschönerung bei Umkehrung des Kopfes. Poggendorff's Ann. 1841, Bd. 54, p. 137 aus Report of the 10th Meeting of the British Association Notices p. 7. — A. Müller, Ueber das Beschauen der Landschaften mit normaler und abgeänderter Augenstellung. Poggendorff's Ann. 1852, Bd. 86, p. 147.

§ 63—64. Lebot in Repertorium der Physik von Fechner 1832, Bd. 2, p. 229 und in Froriep's Notizen 1830, Bd. 28. (Auszüge aus einem Aufsatze, dessen Titel nicht angegeben ist in Annales des Sciences d'observations par Saigey et Raspail 1830, III. — Necker, Ueber einige merkwürdige optische Phänomene, Schreiben an Brewster. (Necker's Rhomboëder.) Poggendorff's Ann. 1833, Bd. 27, p. 502. — Hueck, Ueber die Täuschung des Fernrückens der Gesichtsobjecte. Müller's Archiv 1840, p. 76. — Tourtual, Die Dimension der Tiefe im freien Sehen und im stereoscopischen Bilde. Münster 1842. — Hermann Meyer in Zürich, Ueber einige Täuschungen in der Entfernung und Grösse der Gesichtsobjecte. Archiv f. physiol. Heilk. 1842, p. 316. —— Ueber den Einfluss der Aufmerksamkeit auf die Bildung des Gesichtsfeldes überhaupt und des gemeinschaftlichen Gesichtsfeldes beider Augen insbesondere. Arch. f. Ophth. 1856, II. 2, p. 77. —— Beitrag zur Lehre von der Schätzung der Entfernung aus der Convergenz der Augenaxen. Arch. f. Ophth. 1856, II. 2, p. 92. Poggendorff's Ann. 1852, Bd. 85, p. 198. —— Zur Lehre von der Synergie der Augenmuskeln. Poggendorff's Ann. ibid. p. 207. — Dove, Ueber den Einfluss des Binocularsehens bei Beurtheilung der Entfernung durch Spiegelung und Brechung gesehener Gegenstände. Poggendorff's Ann. 1858, Bd. 104, p. 325. — Nagel, Ueber die ungleiche Entfernung von Doppel-

bildern, welche in verschiedener Höhe gesehen werden. Arch. f. Ophth. 1862, VIII. 2, p. 368. — Wheatstone, Ueber das Sehen mit zwei Augen und das Stereoscop. (Kurze Notiz.) Poggendorff's Ann. 1839, Bd. 47, p. 625 aus Bibl. univers. N. S. T. XVII. p. 174. —— Beiträge zur Physiologie des Gesichtssinnes. I. Ueber eine merkwürdige und bis jetzt unbeachtete Erscheinung beim Sehen mit beiden Augen. Poggendorff's Annalen 1842, Ergänzungsband I. p. 1.. Von Dr. Franz übersetzt aus den Philosophical Transactions 1838, Bd. II. p. 371. — Brücke, Ueber die stereoscopischen Erscheinungen und Wheatstone's Angriff auf die Lehre von den identischen Stellen der Netzhäute. Müller's Archiv 1841, p. 459. — Rollmann, Zwei neue stereoscopische Methoden. Poggendorff's Ann. 1853, Bd. 90, p. 186. cf. ibid. Bd. 89, p. 350. — Faye, Ueber ein neues Stereoscop. Poggendorff's Ann. 1856, Bd. 99, p. 641. Comptes rend. T. XLIII. p. 673. — Halske, Stereoscop mit beweglichen Figuren. Poggendorff's Annalen 1857, Bd. 100, p. 657. — Helmholtz, Das Telestereoscop. Poggendorff's Ann. 1857, Bd. 101, p. 494 und Bd. 102, p. 167. — Volkmann, Die stereoscopischen Erscheinungen in ihrer Beziehung zu der Lehre von den identischen Netzhautstellen. Arch. f. Ophthalm. 1859, V. 2, p. 1. — Dove, Stereoscopische Darstellung eines durch einen Doppelspath binocular betrachteten Typendruckes und Anwendung des Stereoscops, um einen Druck von seinem Nachdruck, überhaupt ein Original von seiner Copie zu unterscheiden. Poggendorff's Ann. 1859, Bd. 106, p. 655 und 657. —— Ueber Stereoscopie. Poggendorff's Ann. 1860, Bd. 110, p. 494. — v. Recklinghausen, Zur Theorie des Sehens. Poggendorff's Ann. 1860, Bd. 110, p. 65. — August, Ueber eine neue Art stereoscopischer Erscheinungen. Poggendorff's Annalen 1860, Bd. 110, p. 582. — Oppel, Bemerkungen über Accommodation beim stereoscopischen Sehen. Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt am Main 1860—1861, p. 48. — v. Recklinghausen, Zum körperlichen Sehen. Poggendorff's Ann. 1861, Bd. 114, p. 170. — F. Burckhardt, Ueber die Empfindlichkeit des Augenpaares für Doppelbilder. Poggendorff's Ann. 1861, Bd. 112, p. 596. — Böttcher, Ueber das Minimum der stereoscopischen Wahrnehmung. Klinische Wochenschrift. Berlin 1866, No. 4. — Listing, Ueber eine neue Art stereoscopischer Wahrnehmung. Poggendorff's Ann. 1870, Bd. 141, p. 225. — Yvon, Ein auf die Reliefempfindung gegründetes Photometer. Poggendorff's Ann. 1873, Bd. 148, p. 334. Comptes rend. T. 75, p. 1102. — van der Meulen en van Dooremaal, Stereoskopisch zien, zonder correspondeerende half-beelden. Onderzoekingen ged. in het Physiol. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool 1873. Derde Reeks II. p. 119. —— Stereoscopisches Sehen ohne correspondirende Halbbilder. Arch. f. Ophthalm. 1873, XIX. 1, p. 137. — Böttcher, Zur Theorie und Construction stereoscopischer Instrumente für wissenschaftliche Diagnostik. Arch. f. Ophthalm. 1874, XX. 2, p. 182. — Brewster, On the conversion of relief by inverted vision. Edinburgh. Phil. Transactions 1847, T. XV. p. 657. — Wheatstone, On some remarkable and hithertoo unobserved phaenomena of binocular vision. (Pseudoscopie.) Philos. Transact. 1852, P. I. p. 1. — Schröder, Ueber eine optische Inversion mit freiem Auge. Poggendorff's Ann. 1852, Bd. 87, p. 306. — Oppel, Ueber ein Anaglyptoscop (Vorrichtung, vertiefte Formen erhaben zu sehen). Poggendorff's Ann. 1856, Bd. 99, p. 466. — Dove, Ueber die Unterschiede monocularer und binocularer Pseudoscopie. Poggendorff's Ann. 1857, Bd. 101, p. 302. — Schröder, Ueber die optische Inversion bei Betrachtung verkehrter, durch optische Vorrichtungen entworfener physischer Bilder. Poggendorff's Ann. 1858, Bd. 105, p. 298. — Sinsteden, Ueber ein pseudoscopisches Bewegungsphänomen. Poggendorff's Annalen 1860, Bd. 111, p. 336. — Mohr, Ueber pseudoscopische Wahrnehmungen. Poggendorff's Ann. 1860, Bd. 111, p. 638. — Dove, Optische Notizen: III. Ueber Inversionen bei binocularer und monocularer Betrachtung perspectivischer Zeichnungen und durchsichtiger Körper. Poggendorff's Ann. 1867, Bd. 132, p. 474. — Rollmann, Pseudoscopische Erscheinungen. Poggendorff's Ann. 1868, Bd. 134, p. 615. — F. Burckhardt, Eine Relief-Erscheinung. Poggendorff's Annalen 1869, Bd. 137.

p. 471. — Emsmann, Eine pseudoscopische und optometrische Figur. Poggendorff's Ann. 1870, Bd. 141, p. 476.

§ 65—66. Panum, Die scheinbare Grösse der gesehenen Objecte. Arch. f. Ophthalm. 1859, V. 1, p. 1. — Förster, Ophthalmologische Beiträge, Berlin 1862. (Mikropsie.) — Drobisch, Ueber die Bestimmung der Gestalt des scheinbaren Himmelsgewölbes. Berichte der Leipziger Gesellschaft der Wissenschaften 1854, p. 107. — Dove, Ueber eine optische Täuschung beim Fahren auf der Eisenbahn. Poggendorff's Annalen 1847, Bd. 71, p. 118. — Oppel, Zur Theorie einer eigenthümlichen Reactionsthätigkeit des menschlichen Auges in Bezug auf bewegte Netzhautbilder. Jahresbericht des physikalischen Vereins zu Frankfurt am Main 1859—1860, p. 54. — Th. W. Engelmann, Ueber Scheinbewegung in Nachbildern. Jenaische Zeitschrift für Medicin und Naturwissenschaft 1867, Bd. III. p. 443. — F. Zöllner, Ueber eine neue Art von Pseudoscopie und ihre Be iehungen zu den von Plateau und Oppel beschriebenen Bewegungs-Erscheinungen. Poggendorff's Ann. 1860, Bd. 110, p. 500. —— Ueber die Abhängigkeit der pseudoscopischen Ablenkung paralleler Linien von dem Neigungswinkel der sie durchschneidenden Querlinien. Poggendorff's Annalen 1861, Bd. 114, p. 587. —— Die Theorie der unbewussten Schlüsse in ihrer Anwendung auf die Gesichtswahrnehmungen p. 378 seines Werkes: Ueber die Natur der Kometen. Leipzig 1872. — Kundt, Untersuchungen über Augenmaass und optische Täuschungen. Poggendorff's Ann. 1863, Bd. 120, p. 118. — Aubert, Ueber Augenmaass und optische Täuschungen. Poggendorff's Ann. 1864, p. 122, p. 178. — Bacologlo, Ueber die von Zöllner beschriebene Pseudoscopie. Poggendorff's Ann. 1861, Bd. 113, p. 333.

IV. Augenbewegungen.

§ 67. Bell, On the motions of the Eye. Philos. Transactions. 1823. — Donders, Beitrag zur Lehre von den Bewegungen des menschlichen Auges. Holländische Beiträge zu den anatomischen und physiologischen Wissenschaften. I. Düsseldorf und Utrecht 1848, p. 105. — Helmholtz, Ueber die normalen Bewegungen des menschlichen Auges. Arch. f. Ophth. 1863. IX. 2, p. 153. — Hering, Die Lehre vom binocularen Sehen. I. Leipzig 1868.

§ 68. Volkmann, Untersuchung über den Stand des Netzhautbildchens. Poggendorff's Ann. 1836, Bd. 37, p. 342. —— Ueber die Lage des Kreuzungspunktes der Richtungsstrahlen des Lichts im ruhigen und bewegten Auge. Poggendorff's Ann. 1838, Bd. 45, p. 207. —— Revision einiger in meinen Beiträgen zur Physiologie des Gesichtssinnes aufgestellten Lehrsätze. (Richtungslinien, Drehpunkt.) Müller's Archiv 1843, p. 1. — J. J. Müller, Untersuchungen über den Drehpunkt des menschlichen Auges. Inauguraldissertation. Zürich 1868. Mit geringen Veränderungen unter gleichem Titel in Archiv für Ophthalmologie 1868, Bd. XIV. 3, p. 183. — Woinow, Ueber den Drehpunkt des Auges. Arch. f. Ophth. 1870, XVI. 1, p. 243. —— Beiträge zur Lehre von den Augenbewegungen. Arch. f. Ophth. 1871, XVII. 2, p. 233. — Volkmann, Zur Mechanik der Augenmuskeln. Berichte der Akademie zu Leipzig 1869, p. 28. — Berlin (in Palermo), Beitrag zur Mechanik der Augenbewegungen (Drehpunkt; Verschiebungen des ganzen Bulbus). Arch. f. Ophth. 1871, XVII. 2, p. 154. — Weiss, Zur Bestimmung des Drehpunktes im Auge. A. f. O. 1875. XXI. 2, p. 132.

§ 69. Ruete, Das Ophthalmotrop. 1846. (Aus den Göttinger Studien 1845.) —— Ein neues Ophthalmotrop. 1857. — Fick, Die Bewegungen des menschlichen Augapfels. Zeitschrift f. ration. Med. Neue Folge 1854. Bd. 4, p. 101. — Wundt, Ueber die Bewegung der Augen und: Beschreibung eines künstlichen Augenmuskelsystems zur Untersuchung der Bewegungsgesetze des menschlichen Auges im gesunden und kranken Zustande. Arch. f. Ophth. 1862. VIII. 2, p. 1—114.

§ 70. Hueck, Die Achsendrehung des Auges. Dorpat 1838. — Meissner, Zur Lehre von

den Bewegungen des Auges. A. f. Ophth. 1855, II. 1, p. 1. —— Ueber die Bewegungen des Auges, nach neuen Versuchen. Zeitschrift für rat. Medicin, 3. Reihe, 1860, VIII. p. 1. — Fick, Neue Versuche über die Augenstellungen. Moleschott's Untersuchungen z. Naturl. d. Menschen. 1858. V. p. 193. — Berthold, Ueber die Bewegungen des kurzsichtigen Auges. Arch. f. Ophthalm. 1865. XI. 3, p. 107. — Hering, Die sogenannte Raddrehung des Auges in ihrer Bedeutung für das Sehen bei ruhendem Blick. Reichert's u. Dubois' Archiv 1864, p. 278. —— Ueber die Rollung des Auges um die Gesichtslinie. Arch. f. Ophth. 1869. XV. 1, p. 1. — Donders, De corresponderende netvlies-meridianen en de symmetrische Rolbewegingen. Onderzoekingen ged. in het Physiol. Laborator. d. Utrechtsche Hoogeschool 1875. Derde Reeks. III. 2, p. 45. —— Die correspondirenden Netzhautmeridiane und die symmetrischen Rollbewegungen. Arch. f. Ophth. 1875, XXI. 3, p. 100. — W. Schön, Zur Raddrehung. I. Mittheilung. A. f. Ophth. 1874, XX. 2, p. 171 u. 308. —— II. Mittheilung ibid. 1875, XXI. 2, p. 205. — F. Arlt jun., Tijdsbepalingen ten aanzien der bewegingen van den oogappel. (Iris.) Onderzoekingen in het Physiol. Laborator. te Utrecht. 1869. Tweede Reeks II. p. 402. — Lamansky, Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit der Blickbewegung, respective Augenbewegung. Pflüger's Archiv für Physiologie 1869, II. p. 418.

§ 71. Donders, Over aangeboren en verkregen associatie. Onderzoekingen in het Physiol. Laborat. te Utrecht 1870. Tweede Reeks III. p. 145. —— Ueber angeborene und erworbene Association. Arch. f. Ophth. 1872. XVIII. 2, p. 153.

§ 72. Böttcher, Ueber Augenbewegungen und binoculare Perspective, nach eigenen Untersuchungen. Arch. f. Ophth. 1866, XII, 2, p. 22. — Donders, De beweging van het oog, toegelicht met het phaenophthalmotroop. Onderzoekingen in het Physiol. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool 1870. Tweede Reeks III. p. 119. —— Die Bewegungen des Auges, veranschaulicht durch das Phaenophthalmotrop. Arch. f. Ophth. 1870, XVI. 1, p. 154. — Hermann, Ein Apparat zur Demonstration der aus dem Listing'schen Gesetze folgenden Raddrehungen. Pflüger's Archiv f. Physiologie 1873, VIII. p. 305.

§ 73. Dobrowolsky, Ueber Rollung der Augen bei Convergenz und Accommodation. Arch. f. Ophth. 1872, XVIII. 2, p. 53. — Donders, De primaire standen van het oog: *a*) vor evenwijdige, *b*) vor convergente blicklijnen. Onderzoekingen ged. in het Pysiol. Laborat. d. Utrechtsche Hoogeschool 1873. Derde Reeks II. p. 380.

§ 74. Schneller, Studien über das Blickfeld. A. f. O. 1875. XXI. 3, p. 133.

§ 75. Donders, Noch etwas über Hueck's vermeintliche Axendrehung des Auges. Holländische Beiträge 1848. I. p. 384. — Aubert, Eine scheinbare bedeutende Drehung von Objecten bei Neigung des Kopfes nach rechts oder links. Virchow's Archiv 1860, Bd. 20, p. 381. — Aub, Finden Raddrehungen der Augen bei Seitwärtsneigungen des Kopfes statt? Archiv für Augen- und Ohrenheilkunde 1870, I. 2, p. 232. — Skrebitzky, Bijdrage tot de leer der bewegingen van het oog. Onderzoekingen in het Phys. Laborat. te Utrecht. 1870. Tweede Reeks III. p. 424. —— Ein Beitrag zur Lehre von den Augenbewegungen. A. f. O. 1871. XVII. 1, p. 107. — Nagel, Ueber das Vorkommen von wahren Rollungen des Auges um die Gesichtslinie. Arch. f. Ophth. 1868, XIV. 2, p. 228 und ibid. 1871, XVII. 1, p. 237. — Breuer, Ueber die Function der Bogengänge des Ohrlabyrinthes. Wiener Medicin. Jahrbücher 1874, Heft 1. — Mulder, De parallele Rolbewegingen der oogen. Onderzoekingen gedaan in het Physiologisch Laboratorium der Utrechtsche Hoogeschool. 1875. Derde Reeks III. 1, p. 118. — Donders, Naschrift over de wet der ligging van het netvlies in betrekking tot die van het blikvlak. ibid. p. 185. — Mulder, Ueber parallele Rollbewegungen der Augen. A. f. O. 1875 XXI. 1, p. 68. — Donders, Ueber das Gesetz der Lage der Netzhaut in Beziehung zu der Blickebene. A. f. O. 1875. XXI. 1, p. 125. — Ritzmann, Ueber die Verwendung von Kopfbewegungen bei den gewöhnlichen Blickbewegungen. Archiv f. Ophth. 1875. XXI. 1, p. 131.

§ 76. Donders, Ueber den Zusammenhang zwischen dem Convergiren der Sehaxen und dem Accommodationszustande der Augen. Holländische Beiträge 1848. I. p. 379. — Adamük, Over de Innervatie der oogbewegingen. Onderzoekingen in het Physiologisch Laboratorium te Utrecht. 1870. Tweede Reeks III. p. 140. —— Bijdrage tot de physiologie van den n. oculomotorius. ibid. p. 398. Deutsch im Centralblatt für die medicinischen Wissenschaften 1870, p. 65. — Samelsohn, Zur Frage von der Innervation der Augenbewegungen. Arch. f. Ophth. 1872. XVIII. 2, p. 142.

Berichtigungen und Nachträge.

Pag. 403 Z. 5 v. u. muss das Minuszeichen vor $F_,$ wegfallen.
- 408 Z. 7 v. u. statt Winkel a lies Winkel α.
- 415 Z. 8 v. o. statt 7,8016 Mm. lies 7,8036 Mm.
- 416 Formel II) und III) muss es immer statt $\sqrt[3]{\ }$ heissen $\sqrt[2.3]{\ }$.
- 416 Z. 10 v. o. statt: »ϱ_1 und ϱ_2 mit der Gesichtslinie zusammenfallen, aber mit der Axe des Ophthalmometers einen Winkel« lies: »ϱ_1 und ϱ_2 mit der Axe des Ophthalmometers zusammenfallen, aber mit der Gesichtslinie einen Winkel.«
- 416 Z. 4 v. u. statt »ϱ^0« lies »ϱ_0«.
- 422 Tab. III. Die beiden Minuszeichen der letzten Zeile (IX) müssen wegfallen. Mittel statt 22,506 lies 22,546.
- 431 Gleichung XV muss heissen $x = \frac{r \cdot (d - F_{,,})}{2\,(d - F_{,,}) - r}$.
- 432 Z. 4 v. u. statt $\frac{F_,}{z} = \frac{F_{,,}}{d}$ lies $\frac{F_,}{z} + \frac{F_{,,}}{d}$.
- 433 Z. 9 v. o. statt $dF_,x - F_,xd - F_,xF_{,,}$ lies $dF_,x - F_,xd + F_,xF_{,,}$.
- 447 Z. 3 v. o. statt 18,586 lies 18,226.
- 455 Tab. VIII. letzte Zahl statt 0,11 lies 0,9.
- 463 Z. 12 v. o. sind die Worte: »und ein eben so allmäliges Herunterrucken der Brennweiten der übrigen Meridiane« zu streichen.
- 469 Z. 6 v. u. statt »XVIII. p. 363« lies »XII. p. 334«.
- 514 Z. 19 v. o. statt »Bd. 52« lies »Bd. 32«.
- 517 Z. 2 v. u. statt »Farbeneinheit« lies »Farbenreinheit«.
- 553 Z. 21 v. u. statt »Annalen 1864« lies »Annalen 1862«.
- 574 Z. 5 v. o. statt »1862« lies »1852«.
- 621 Z. 11 v. o. statt »geometrisch gelegene Punkte« lies »geometrisch gleich gelegene Punkte.«

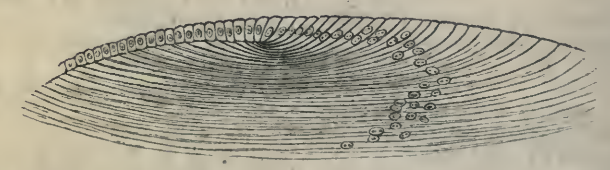
Zu p. 631: Später hat indess (woran ich durch Herrn Professor Nagel erinnert wurde) Zöllner (Ueber die Natur der Kometen. 1872. p. 407) Beobachtungen mitgetheilt, welche den unter 8) hingestellten Satz widerlegen, und aus welchen hervorgeht, dass bei momentaner Beleuchtung die Täuschung nicht schwächer, sondern im Allgemeinen stärker ist. Ferner führt Zöllner Beobachtungen an, nach welchen die pseudoscopische Ablenkung geringer ist, wenn man durch ein rothes Glas sieht. Drittens beobachtete Zöllner, dass die noniusartige Verschiebung der Querstreifen verändert wird beim Betrachten des Musters durch eine Cylinderlinse, und leitet die Erscheinung von dem Astigmatismus der Augen ab. — Ausserdem hält Zöllner an der schon in seinen früheren Arbeiten entwickelten Erklärung fest, dass die Täuschung dadurch entsteht, dass verschiedene Zeiten erforderlich sind, um zu dem Urtheile über Parallelismus oder Nichtparallelismus der Längs- und Querlinien zu kommen, wegen deren Begründung ich auf das Original verweise.

Zu p. 660: In seiner vorläufigen, daselbst citirten Mittheilung nimmt Donders geradezu eine »Primärstellung *b)* für convergente Blicklinien« an, welche dadurch charakterisirt ist, »dass bei allen Graden von symmetrischer Convergenz in der unveränderten Blickebene die horizontalen Meridiane stets gleichgerichtet bleiben, dass die Convergenzbewegungen also durch Drehung um Axen stattfinden, welche senkrecht auf der Blickebene stehen, d. h. ohne Drehung um die Blicklinie«. Diese Primärstellung würde also der von Meissner angegebenen gleich sein und könnte wohl als »Meissner'sche Primärstellung« von der Listing'schen Primärstellung unterschieden werden.

Sachregister.

Corrigenda.

Im Cap. V. d. B. p. 33 ist an Stelle der dort unrichtig reproducirten Abbildung (Entwickelung der Linse nach v. Becker) Fig. 9 die beistehende correcte Wiedergabe der Originalzeichnung zu setzen.



Ferner ist im Cap. VI. d. B. p. 64 die Fig. 1 (Brückencolobom nach Saemisch) nicht richtig gestellt. Der nach oben stehende Theil muss nach unten gerichtet sein.

Die Redaction.

Druck von Breitkopf und Härtel in Leipzig.

